



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Betreuer

DIPLOMARBEIT

Über die Qualität der Standortbestimmung für Location Based Services im Kontext der Entwicklung von Mobilfunk- und globalen Satellitennavigationssystemen

ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation
Forschungsgruppe Geoinformation
der Technischen Universität Wien

unter der Leitung von

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Navratil

FG Geoinformation

durch

Bernhard Haselgrübler

Stachegasse 19/1/109, 1120 Wien

E665 / 8825524

tuw@hasb.name

Wien, am 18.10.2015

Kurzfassung / Abstract

Location Based Services (LBS) sind mittlerweile mit all ihren Varianten eine gut eingeführte Technologie und auch in der Wissenschaft eine breit diskutierte und beschriebene Thematik. Vieles davon wird heute schon als „selbstverständlich“ empfunden und täglich am stets griffbereiten Mobilgerät konsumiert. Bei genauerer und kritischer Betrachtung ist jedoch bald zu bemerken, dass noch eine Reihe von Schwierigkeiten vorhanden sind, für die, aus unterschiedlichsten Gründen, sobald keine zufriedenstellende Lösung gefunden und umgesetzt werden kann. Das betrifft insbesondere den Kern eines jeden LBS, die Bestimmung des Ortes, an dem der Anwender auf einen solchen Dienst zugreift.

Die Genauigkeit bzw. Qualität einer solchen Lokalisierung entscheidet letztendlich, welche LBS möglich, sinnvoll und auch ökonomisch sind. Doch gerade die Beschreibung und Beurteilung der Qualität dieser Standortbestimmungen sind ein schwieriger und daher meist unterschätzter Aspekt der LBS. Dies trifft natürlich nicht gleichermaßen auf alle Dienste zu, mit besonderer Schwere jedoch auf jene, die von einer akribischen und zuverlässigen Ortung abhängig sind, wie z.B. der mobile Notruf oder zukünftig die (hoffentlich) EU-weit einheitliche und in Fahrzeugen integrierte Variante eCall.

Die vorliegende Arbeit setzt sich genau mit dieser Problemstellung auseinander. Welche Faktoren, Parameter, Maße und Vorschriften wurden und werden herangezogen, um Genauigkeiten anzugeben? Wo funktionieren sie und wo scheitern sie und was könnten die Gründe dafür sein? Dazu werden u.a. eigene Messdaten und Berechnungen aus Satellitenortungen verwendet und eingehend diskutiert.

Letztendlich lassen sich einige sehr entscheidende Aussagen machen zu Voraussetzungen, ohne die sich Genauigkeiten zu Ortsbestimmungen für LBS nicht beurteilen lassen. Insbesondere bei mobilen Notfalldiensten ist für die Hilfesuchenden die exakte und verlässliche Ermittlung ihrer Position entscheidend, egal wo sie sich befinden und mit welchen Methoden dies durchgeführt wird.

Schlüsselwörter:

Ortsbestimmung, Genauigkeit, Location Based Services, Notfalldienste, Mobilfunknetze, GNSS, E-911, E-112, eCall

Location Based Services (LBS) are meanwhile with all its variants a well established technology and also in the science a broadly discussed and described topic. Much of this is felt today as a „matter of course“ and consumed daily at the always-ready mobile device. On more exact and critical consideration however it is to be noticed soon, that still a number of difficulties exist, for which, for most different reasons, no satisfactory solution can be found and implemented soon. This concerns in particular the core of each LBS, the determination of the place where the user accesses such a service.

The accuracy respectively quality of such a localization decides finally, which LBS are possible, sensible and also economic. But definitely the description and assessment of the quality of these position fixings are a difficult and therefore mostly underestimated aspect of LBS. This of course does not apply equally to all services, with particular severity, however, to those, which are dependent on a meticulous and reliable localisation, as for example the mobile emergency call or in the future the (hopefully) EU-wide uniform and into vehicles integrated variant eCall.

The present work argues exactly with this problem formulation. What factors, parameters, measures and regulations have been and are consulted in order to specify accuracies? Where do they work and where do they fail and what could be the reasons for it? Thereto, among other things, own measuring data and calculations from satellite fixes are used and discussed thoroughly.

Finally some very determining statements can be made to the prerequisites, without which accuracies of localisations for LBS cannot be judged. Especially with mobile emergency services the accurate and reliable determination of their position is crucial for those seeking help, no matter where they are and with which methods this is carried out.

Keywords:

Positioning, Accuracy, Location Based Services, Emergency Services, Mobile Phone Networks, GNSS, E-911, E-112, eCall

Vorwörter

Entstehung und Zweck dieser Arbeit:

Ursprünglicher Ausgangspunkt dieser jetzt schon lange gediehenen Arbeit waren ein per Aushang kundgetanes Interesse des Institutes für Geoinformation der TU Wien an der Thematik der Ortsbestimmung in Mobilfunknetzen hinsichtlich ihrer Verwendung für Location Based Services (LBS) und einer Evaluierung von postulierten Genauigkeiten in einer Reihe von (mehr oder weniger wissenschaftlichen) Medien. Aus der anfänglichen Bearbeitung in Richtung eines Seminars ist aus unterschiedlichsten Gründen letztendlich doch einiges mehr geworden und der Autor entschloss sich, daraus eine umfangreichere Abschlussarbeit für sein Diplom zu machen.

Zum einen stellte sich die zu untersuchende Thematik als wesentlich komplexer heraus, als sie bei einfacher Betrachtung wohl heute noch erscheint. Somit haben schnelle Aussagen wenig Bestand und wären mitunter sogar falsch gewesen. Zum anderen ist dem Autor auch kein „durchgängiges“ Zeitpensum zur Verfügung gestanden, was zu einer Verteilung auf mehrere Arbeitsphasen führte. Kein Nachteil ohne Vorteil, es konnten auf diese Weise Erkenntnisse erlangt werden, die in „Kurzarbeiten“ nicht möglich sind. Auch Zukunftsprognosen bekommen so wesentlich mehr Gewicht und Zuverlässigkeit.

Hans-Joachim Queisser zitierte in seinen „Kristallinen Krisen“ (*Queisser, 1985*)¹ den amerikanischen Wissenschaftsphilosophen und -historiker Thomas Kuhn (*Wikipedia, 2014u*): „Wir unterscheiden zwischen der normalen und der revolutionären Wissenschaft. Die normale Wissenschaft erarbeitet neue Erkenntnisse, die sich ohne große Schwierigkeit in ein schon vorhandenes System einordnen lassen. Normale Wissenschaft liefert Mosaiksteine zur Erweiterung eines Bildes, über das sich die Wissenschaftler im wesentlichen einig sind“. Wird dieses »Bild« jedoch durch neue experimentelle oder mathematische Erkenntnisse gestört und „(...) Bleibt ein Widerspruch auch nach aller Prüfungen bestehen, so ist das der Beginn einer wissenschaftlichen Revolution. Der Fortschritt in der Naturwissenschaft geht auf diese Weise nicht stetig und unaufhaltsam vor sich“. Vorliegende Arbeit bringt, so gesehen, einige kleine Mosaiksteine hervor zu Diskussionsfeldern über die Thematik der Ortsbestimmung für LBS, insbesondere ihrer Qualität, und dies schwerpunktmäßig bei kritischen Diensten wie z.B. Notrufen.

Dem schnellen Leser mitunter erscheinende Langatmigkeiten in den einleitenden Grundlagenteilen stehen eine Diskussion von wichtigen Entwicklungssträngen in relevanten Technologiebereichen der Mobilfunk- und Satellitenpositionierungssysteme mitsamt umfangreichen Literaturverweisen gegenüber. Die Auswertung eigener Satellitenmessdaten mitsamt einer Visualisierung unterschiedlichster Fehlermaße aus dem Bereich der Ortsbestimmung und Navigation ist durchaus auch für den Messtechniker in der Praxis interessant und, wie sich offensichtlich herausgestellt hat, von beinahe „zeitloser“ Relevanz. An einem Beispiel konnte demonstriert werden, mit welchen sehr wagen Genauig-

¹ Dieses Mitte der 80er-Jahre bekannt gewordene „Geschichtsbuch“ schildert in sehr dichter und präziser Weise die weltweite Entwicklung der Mikroelektronik aus naturwissenschaftlicher, aber auch wirtschaftlicher Sicht. Queisser promovierte 1958 auf dem Gebiet der experimentellen Festkörperphysik an der Universität Göttingen und war 1970 einer der Gründungsdirektoren des Max-Planck-Institutes für Festkörperforschung in Stuttgart. Er gilt als Erfinder der besonders leistungsstarken Infrarot-Leuchtdioden, hervorgegangen 1965 aus seinen Tätigkeiten in den Bell Labs. Diese Dioden dienen bis heute z.B. als Grundlage in unzähligen Fernbedienungen für verschiedenste Geräte (*Wikipedia, 2014k*).

keitserwartungen hinsichtlich seiner Standortbestimmung ein Hilfesuchender in einer Großstadt wie Wien heute tatsächlich zu rechnen hat und auf welche Weisen dies zukünftig verbessert werden kann. Schlussendlich macht der Autor einen Vorschlag, wie mit einem relativ einfachen aber effizienten System die Ortungsfrage bei Notfällen in der EU gelöst werden könnte (ohne jedoch auf datenschutzrechtliche Belange einzugehen).

Zum Zitierstil:

Übernommene Angaben bzw. Aussagen aus diversen Quellen werden meist nur sinngemäß, nicht wörtlich wiedergegeben. Ist dies dennoch der Fall, so sind sie i.d.R. unter Anführungszeichen gestellt. Inhalte aus denselben Referenzen, die über mehrere Absätze hinweg beschrieben sind, erfahren, der besseren Lesbarkeit wegen, des Öfteren erst im letzten Absatz ihren Literaturverweis. Dies soll keinesfalls ein „Verschweigen“ sein, geht stets aus dem Zusammenhang hervor und verbessert das Schriftbild wesentlich. Auch neigt der Autor dazu, in Zweifelsfällen mehr Verweise, auch zu fachlich wohlbekannten Standardwerken, anzuführen, da ihm die medial mitunter heftig geführten Diskussionen zu „plagiathaften“ Arbeiten bekannt sind.

Die heutige globale Vernetzung ermöglicht beinahe unendliche Recherchen. Gleichzeitig ist es absolut unmöglich geworden, zu einem Thema nur ansatzweise „alles“ zu finden oder gar zu lesen. Darum lässt sich nie ausschließen, dass ähnliche Gedankengänge und Schlussfolgerungen in Quellen bereits vorhanden sind, die dem Autor bis dato nicht bekannt sind. Dies ist dann jedoch von zufälliger, nicht beabsichtigter Natur.

Zur Rechtschreibung:

Als „Schüler“ der im gymnasialen Bereich mitunter sehr streng geführten „alten“ deutschen Rechtschreibung kam der Autor nicht umhin, sich ob der teilweise widersprechenden Reformen mit umfangreichen Nachschlagewerken in Papierform auszurüsten und letztendlich, um auch eine gewisse Konsistenz zu erreichen, mit dem „Duden-Korrektor“ (*Duden, 2010b*) softwaretechnischer Hilfe zu bedienen. Somit ist das Geschriebene, auch das wörtlich zitierte, auf dem letzten anerkannten Stand der „neuen“ deutschen Rechtschreibung. Stehen hierbei mehrere Möglichkeiten offen, so wurde meist dem „konservativerem“ Vorschlag der Vorzug gegeben.

Ähnlich der lange geführten Diskussionen zu unterschiedlichen Aspekten der „neuen“ deutschen Rechtschreibung verhält es sich offensichtlich seit geraumer Zeit mit der „geschlechtergerechten bzw. -neutralen“ Schreibweise. Heute sind bereits zahlreiche Vorschläge, Hinweise und bisweilen sogar strenge Verpflichtungen auf unterschiedlichster Ebene zu finden (Bund, Länder, Gemeinden, Bildungseinrichtungen, Forschungsinstitute usw.), die jedoch leider alle eines gemeinsam haben: sie sind im gesamten deutschen Sprachraum weder einheitlich noch allgemein anerkannt und somit auch nicht normativ geregelt (*ORF, 2014; Pohl, 2014; Wikipedia, 2014i; d*). Mangels dieser Voraussetzungen können solche Schreibweisen nicht in Wörterbücher oder Software für die Textverarbeitung übernommen werden. Es ist daher kaum möglich, diesbezüglich ein „passendes“ Schriftbild zu führen, das nicht in absehbarer Zeit wieder abgelehnt und widerrufen wird und somit auch die fachlichen Aussagen eines geschriebenen Textes negativ beeinflussen würde.

Der Autor hat sich daher entschlossen, bei seinen Formulierungen abseits diverser Forderungen zu Binnen-I, Gender-Gap, Queer-Theorien usw. zu verbleiben². Weiters wird, wegen widersprüchlicher Beurteilung, auch auf etwaige „Generalklauseln“, die in unterschiedlicher Form meist besagen, dass alles „männlich“ bzw. „weiblich“ formulierte natürlich auch für den jeweils anderen Part gilt, verzichtet (*Wikipedia, 2014d; g; r*). Es bleibt zu hoffen, dass entsprechende Diskussionen und Postulierungen in Zukunft weniger emotional³, dafür aber mehr ergebnisorientiert geführt bzw. gemacht werden. Ziel sollte doch stets sein, ein konsenshaftes und anwendbares Regelwerk für die deutsche Rechtschreibung zu erhalten.

Dank:

Der Autor möchte sich in seiner Danksagung hier auf den akademischen Teil beschränken und neben seinen überaus geduldigen Betreuer, Priv.Do. Gerhard Navratil, die Professoren Andrew Frank (Leiter FG Geoinformation), Stephan Winter (heute Leiter des Bereiches Geomatics am Department Infrastructure Engineering der Universität Melbourne) und Martin Staudinger (heute Studiengangsleiter Wirtschaftsinformatik der Ferdinand Porsche FernFH in Wien) anführen. Sie haben in verschiedenen Speziallehrveranstaltungen wesentlich zu einem Know-how des Autors beigetragen, das es ihm ermöglichte dieses Werk zu erarbeiten. Zuletzt noch ein besonderes (posthumes) Dankeschön an Dr. Markus Karl von Pförtl, der mit seinen philosophischen, historisch-antropologischen und theologischen Weltansichten in vielen Diskussionen so manchen Grundstein und gute Inspirationen des Autors legte bzw. bewirkte.

Wien, im Herbst 2015

Bernhard Haselgrübler

² Ein kleines Beispiel soll verschiedene bereits praktizierte Schreibweisen zeigen: LeserInnen, Leser/-innen, LeseRinnen, Leser(innen), Leser_innen, Leser*innen, Leser_Innen, Leser*Innen, Leserinner und Leser u.ä.. Mitunter wird auch argumentiert, dass unterschiedliche Varianten nicht dasselbe aussagen (können) und eine Beschränkung auf nur „zwei“ Geschlechter heute schon zu kurz gegriffen sei (*Wikipedia, 2014*). Wieder andere Forschung schlägt vor, vollkommen geschlechtsneutral (i.S. von vermeidend) zu formulieren (*Simon, 2014*). O.a. Bsp. würde dann lauten: „Lesex“, wobei also alle Genus-Endungen einfach durch ein „x“ ersetzt werden. Ob dieser vielen „Erkenntnisse“ ist es für Schreibende heute höchst diffiziel, sich, wenn überhaupt, bezüglich der Vermeidung diverser „Diskriminierungen“ für die eine oder andere Variante zu entscheiden.

³ In Österreich führte dies tatsächlich auch zu einer Änderung des Textes der Bundeshymne mittels Initiativanträgen und Nationalratsbeschluss über ein Bundesgesetz mit Wirkung ab Jänner 2012. Dem Gesetz gingen zwar politisch heftig umstrittene Diskussionen voraus, es wurde jedoch auf keinen mehrheitlichen Volksentscheid gesetzt (*Jandl, 2011; Wikipedia, 2014q*).

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract	i
Vorwörter	iii
Inhaltsverzeichnis	vi
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	ix
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und These.....	1
1.2. Vorgangsweise, Inhaltsübersicht und Begriffsfestlegungen	4
2. Grundlagen zu Mobilfunk und GNSS	7
2.1. Mobilfunk-Netze	7
2.1.1. Der Begriff Mobilfunk	7
2.1.2. Die Entwicklung des Mobilfunks als Grundlage für Location Based Services	9
2.1.2.1. Die analogen Wurzeln des Mobilfunks.....	9
2.1.2.2. GSM und WAP – digitale Systeme für mobile Dienste	12
2.1.2.3. UMTS – die dritte Generation im zellularen Mobilfunk.....	16
2.1.2.4. Erweiterungen und Nachfolger von UMTS	19
2.1.3. Die Netzarchitektur bei GSM, UMTS und LTE in ihrer Bedeutung für LBS.....	28
2.1.3.1. Übersicht und Teilsysteme von GSM	28
2.1.3.2. UMTS entwickelt sich parallel zu GSM	33
2.1.3.3. LTE dient für schnelle Internetverbindungen	38
2.1.4. Wichtige Mobilfunkcharakteristika für die Ortsbestimmung.....	39
2.1.4.1. Ein Funknetz aus Zellen	39
2.1.4.2. Der Übertragungskanal und die Effizienz von GSM	43
2.1.4.3. Timing Advance und Handover	46
2.1.4.4. Zusammengefasste Folgerungen.....	47
2.2. Das Global Positioning System als Beispiel für ein GNSS.....	48
2.2.1. Entwicklungsgeschichte.....	49
2.2.2. Systemaufbau	51
2.2.2.1. Das Raumsegment	51
2.2.2.2. Das Kontrollsegment	53
2.2.2.3. Das Nutzersegment.....	54
2.2.3. Messverfahren und Fehlereinflüsse.....	56
2.2.3.1. Beobachtungsprinzip und Methodik	56
2.2.3.2. Fehlerbehandlung	59
2.2.3.3. Selective Availability und Anti-Spoofing.....	62
2.2.4. Differentielles GPS	64

3. Ortsbestimmung und Location Based Services	68
3.1. Warum Ortsbestimmung?	68
3.1.1. Next Generation Networks und Ortsbestimmung	69
3.1.2. Vorgaben zum mobilen Notruf in den USA	72
3.1.3. Der einheitliche und mobile Notruf in der EU	75
3.1.4. eSafety und eCall	82
3.1.5. Besserer Wettbewerb durch bessere Dienste	84
3.2. Aufbau von LBS und Standortgenauigkeiten	85
3.2.1. Architektur eines LBS	86
3.2.2. Standortgenauigkeit für unterschiedliche LBS	88
3.3. Ortsbestimmungsmethoden für LBS	89
3.3.1. Einteilung der Methoden	91
3.3.2. Die Zelle selbst als Standort	92
3.3.3. Ergänzungen zum Zellenstandort	94
3.3.4. Richtungsmessungen zur Ortsbestimmung	95
3.3.5. Methoden beruhend auf Laufzeitmessungen	96
3.3.6. Einbeziehung eines GNSS	100
4. Koordinatensysteme, Fehlermaße und GPS-Messungen	103
4.1. Koordinaten und ihre Systeme sowie zugehörige Transformationen	103
4.1.1. Astronomische und terrestrische KS	104
4.1.2. Globale und lokale KS	108
4.1.3. Kartesische und geographische KS	112
4.1.4. Räumliche und ebene KS	114
4.2. Fehlermaße in der Ortsbestimmung und Navigation	115
4.2.1. Eindimensionale Genauigkeitsmaße	115
4.2.2. Zweidimensionale Genauigkeitsmaße	116
4.2.3. Dreidimensionale Genauigkeitsmaße	118
4.2.4. Weitere mögliche Genauigkeitsmaße	118
4.3. Testmessungen mit zwei GPS-Handgeräten	119
4.3.1. Messgebiet, Messgeräte und Vorgangsweise	119
4.3.2. Transformationen	121
4.3.3. Ergebnisse, Fehlermaße und Visualisierungen	122
5. Simulationen und Feldversuche aus Quellen sowie Fehlereinflüsse	128
5.1. Simulationen für die Ortsbestimmung mit Mobilfunksignalen	128
5.1.1. Aufbau und Ergebnisse der Simulationen	129
5.1.2. Feldversuch zur Evaluierung der Simulationen	133
5.1.3. Interpretation der Ergebnisse	135

5.2. Feldversuche und Simulationen zu Assisted-GPS.....	137
5.3. Spezifische Fehlereinflüsse bei der Ortsbestimmung mit Mobilfunksignalen.....	145
6. Analysen und Erkenntnisse	149
6.1. GPS-Messungen, Transformationen und Fehlermaße.....	149
6.2. Simulationsrechnungen	151
6.3. Angaben zu Feldversuchen und Testfeldmessungen.....	154
6.4. Recherchierte Vergleichsangaben aus der Literatur.....	157
7. Resultate und weiterführende Aufgaben	162
7.1. Vorausgehende Zusammenfassung	162
7.2. Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	163
7.3. Zukünftige Ansätze	167
7.4. All-In Universalsensoren – ein Lösungsweg?.....	170
Literaturverzeichnis	I
Anhang 1 – Visualisierungen	A-1
Anhang 2a – Messdaten	A-23
Anhang 2b – Berechnungen	A-29
Anhang 2c – Ergebnisse	A-41

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1–1.: Beispiel eines LBS-Referenzmodells (Petrova und Wang, 2008).....	4
Abb. 2–1.: Unterschiedliche Mobilfunksysteme (Walke, 2000).....	8
Abb. 2–2.: DynaTAC 8000X (Wikipedia, 2014c).....	10
Abb. 2–3.: Analoge und digitale Standards bei Mobilfunksystemen (Walke, 2000).....	11
Abb. 2–4.: Mobiltelefon Nokia 7110 (Wikipedia, 2014q).....	16
Abb. 2–5.: IMT-2000 Mobilfunksysteme (UMTSlink, 2009a).....	17
Abb. 2–6.: Datenraten bei UMTS und dessen Erweiterungen (Brückmann, 2008).....	19
Abb. 2–7.: Geschwindigkeitsvergleich der Datenübertragung in Fest- und Mobilnetzen (Redl, 2007).....	21
Abb. 2–8.: Steigerung der Übertragungen in UMTS- und HSPA-Netzen (Rysavy-Research, 2009).....	21
Abb. 2–9.: Smartphone mit A-GPS und Karte (ViewRanger, 2014).....	22
Abb. 2–10.: LTE-Logo (3GPP, 2014a).....	23
Abb. 2–11.: Entwicklung von Mobilfunktechnologien mit Übertragungsraten (Rysavy-Research, 2009).....	24
Abb. 2–12.: Latenzzeiten unterschiedlicher Mobilfunktechniken des 3GPP (Rysavy-Research, 2009).....	24
Abb. 2–13.: LTE-A-Logo (3GPP, 2014b).....	26
Abb. 2–14.: Relays in LTE-Advanced Mobilfunknetzen (Rysavy-Research, 2009).....	27
Abb. 2–15.: Systemhierarchie von GSM (Eberspächer und Vögel, 1997).....	28
Abb. 2–16.: Funktionale Architektur eines GSM-Netzes (Walke, 2000).....	29
Abb. 2–17.: Komponenten des GSM-Funkteilsystems (Eberspächer und Vögel, 1997).....	30
Abb. 2–18.: Komponenten des GSM-Vermittlungsteilsystems (Eberspächer und Vögel, 1997).....	31
Abb. 2–19.: Komponenten des GSM-Betreiberteilsystems (Eberspächer und Vögel, 1997).....	32
Abb. 2–20.: Basisarchitektur eines kombinierten GSM-UMTS-Netzes (Schnabel, 2014v).....	34
Abb. 2–21.: Roaming-Prinzip bei UMA (Ovrebo und Schwan, 2002).....	35
Abb. 2–22.: Anbindung von Femtozellen an das UMTS-Kernnetz (LTEmobile, 2014).....	35
Abb. 2–23.: Modell eines zellularen Mobilfunknetzes (Eberspächer und Vögel, 1997).....	40
Abb. 2–24.: Topologie eines zellularen Mobilfunknetzes unter realen Bedingungen (Jobmann, 1999).....	40
Abb. 2–25.: BTS-Standardkonfiguration (Heine, 1998).....	41
Abb. 2–26.: BTS-Schirmzellenkonfiguration (Heine, 1998).....	41
Abb. 2–27.: Sektorisierte BTS (Heine, 1998).....	42
Abb. 2–28.: Vielfachzugriffsverfahren bei GSM-900 (Gutmann, 2007).....	43
Abb. 2–29.: Überlagerung mehrerer Ausbreitungspfade beim Mobilfunk (Jobmann, 1999).....	44
Abb. 2–30.: Slow Fading des Mobilfunksignals (Jobmann, 1999).....	44
Abb. 2–31.: Fast Fading des Mobilfunksignals (Jobmann, 1999).....	45
Abb. 2–32.: Timing Advance in GSM-Netzen (Jobmann, 1999).....	46
Abb. 2–33.: Handover-Hysterese bei GSM (Jobmann, 1999).....	47
Abb. 2–34.: Satellitenkonstellation von GPS (Thomä, 1996).....	51
Abb. 2–35.: Schematische Darstellung eines GPS-Satelliten (Seeber, 1989).....	52
Abb. 2–36.: Die ursprünglichen Stationen des GPS-Kontrollsegments (Seeber, 1989).....	53
Abb. 2–37.: Geometrie bei der Positionsbestimmung mit GNSS (Kahmen, 1997).....	57
Abb. 2–38.: Mehrwegeausbreitung beim Satellitenempfang (Seeber, 1989).....	60
Abb. 2–39.: Satellitengeometrie und PDOP (Seeber, 1989).....	61
Abb. 2–40.: Steigerung der Genauigkeit durch Abschaltung der SA (IGEB, 2004).....	63
Abb. 2–41.: Prinzip der Positionsbestimmung mit D-GPS (Kahmen, 1997).....	64
Abb. 3–1.: Bevölkerungsdichte der USA nach Bundesstaaten (Wikipedia, 2010c).....	74
Abb. 3–2.: County-Grenzen der USA (Wikipedia, 2010a).....	75

Abb. 3-3.: eCall-Logo (Information-Society, 2011).....	82
Abb. 3-4.: Funktionsweise von eCall (Europäische-Komm, 2009a).....	84
Abb. 3-5.: Architektur für LBS (Brimicombe und Li, 2009).....	86
Abb. 3-6.: Beitragende Aspekte zu LBS (Smith et al., 2001).....	86
Abb. 3-7.: Funktionalismus bei der Ortsbestimmung für LBS (Wohlert, 2000)	87
Abb. 3-8.: Applikationskategorien bei LBS (Steiniger et al., 2006).....	87
Abb. 3-9.: Überblick zu Ortsbestimmungsmethoden (Irmscher, 2009).....	90
Abb. 3-10.: Genauigkeitspotential von verschiedenen Ortsbestimmungsmethoden (Wang, B., 2008).....	91
Abb. 3-11.: Methode Cell-ID bei sektorisierter Zelle (Gutmann, 2007)	93
Abb. 3-12.: TA / RSS bei sektorisierter Zelle (Gutmann, 2007)	94
Abb. 3-13.: Verschneidung von Kreisringen (TA / RSS) (Gutmann, 2007)	95
Abb. 3-14.: Ortsbestimmung mittels Richtungserfassung (Gutmann, 2007).....	95
Abb. 3-15.: Messung der Ankunftszeiten (TOA) (Gutmann, 2007).....	97
Abb. 3-16.: Messung der Rundlaufzeiten (RTD) (Gutmann, 2007).....	97
Abb. 3-17.: Bestimmung von Zeitdifferenzen im Uplink (TDOA) (Gutmann, 2007).....	98
Abb. 3-18.: Bestimmung von Zeitdifferenzen im Downlink (E-OTD) (Gutmann, 2007).....	99
Abb. 3-19.: A-GNSS im Mobilfunknetz (Eissfeller et al., 2005)	101
Abb. 4-1.: CIS mit Satellitenbahn (Kahmen, 1997)	105
Abb. 4-2.: CTS für Positionsbestimmung mit Satelliten (Kahmen, 1997)	106
Abb. 4-3.: Kartesische und geographische Koordinaten (Bauer, 1997) bearbeitet.....	113
Abb. 4-4.: Die 10 Stationen des Messgebietes (VOR, 2000) bearbeitet.....	120
Abb. 4-5.: GPS-Empfänger der Testmessungen (Trimble, 2000; Garmin, 2002)	120
Abb. 4-6.: Umfang der GPS-Messungen (Autor).....	122
Abb. 4-7.: Fehlschläge mit dem Trimble-Empfänger (Autor).....	122
Abb. 4-8.: Verhältnis 3D / 2D-Ergebnisse mit dem Trimble-Empfänger (Autor).....	123
Abb. 4-9.: Berechnete Fehlermaße der Stationen 1 – 10 gesamt (Autor).....	124
Abb. 4-10.: Die 10 Stationen im Vergleich mittels 1dRMS (Autor).....	124
Abb. 4-11.: Umgebungssituation der Station 1 (Autor).....	125
Abb. 4-12.: Station 1 mit Fehlerellipsen (Autor).....	126
Abb. 4-13.: Station 1 mit Fehlerkreisen (Autor).....	126
Abb. 4-14.: Gesamtstreubild mit Fehlerkreisen (Autor).....	127
Abb. 5-1.: Aufbau des Ortungssimulators (Lundqvist et al., 1998).....	129
Abb. 5-2.: 4 / 12 Frequenz-Wiederhol-Muster eines GSM-Netzes (Wylie-Green, 1998).....	130
Abb. 5-3.: Genauigkeit verschiedener Ortungsmethoden aus Simulationsrechnungen (Autor).....	131
Abb. 5-4.: Aufbau des Feldversuchs mit OTD (Ruutu, 1998).....	133
Abb. 5-5.: Nokia 8110 (Nokia-8110, 2009)	134
Abb. 5-6.: Fehlerhistogramm für Ortungen im Standby-Modus (Ruutu, 1998).....	134
Abb. 5-7.: Fehlerhistogramm für Ortungen im Gesprächs-Modus (Ruutu, 1998).....	135
Abb. 5-8.: Aufbau der A-GPS-Technologie von SnapTrack (Burroughs et al., 2000).....	138
Abb. 5-9.: Ergebnisse von Simulationsrechnungen zu SnapTrack WAG (Moeglein und Krasner, 1998).....	139
Abb. 5-10.: Bsp. einer SnapTrack Ortsbestimmung in Shinbashi / Tokyo (Moeglein und Krasner, 1998)	141
Abb. 5-11.: Streubild zur SnapTrack Ortsbestimmung in Shinbashi (Moeglein und Krasner, 1998)	141
Abb. 5-12.: Situation städtische Fußgängerzone (Madrid, dicht verbaut) (Sheynblat, 2001).....	142
Abb. 5-13.: Situation Hyde Park (London, im Freien) (Sheynblat, 2001).....	142
Abb. 5-14.: Situation Restaurant Chevaux de Marly (Paris, im Gebäude) (Sheynblat, 2001)	142
Abb. 5-15.: Genauigkeit von Testmessungen mit SnapTrack HWAG (Biacs et al., 2002).....	143
Abb. 5-16.: Beispiel zu SnapTrack HWAG mit 5 Messungen aus 4 Quellen (Krasner et al., 2002)	144
Abb. 5-17.: Flussdiagramm zu einer Hybridlösung mit WAG (Krasner et al., 2002).....	145

Abb. 7–1.: Entwurf eines „Wiener Centralbahnhofes“ (Großer-Bahnhof, 2006)	167
Abb. 7–2.: U-Bahn-Anbindung des neuen Wiener Hauptbahnhofes (Hauptbahnhof-Wien, 2009) bearbeitet.....	168
Tab. 2–1.: Übersicht zur zeitlichen Entwicklung des Mobilfunks (Autor)	14
Tab. 2–2.: Generationen im zellularen Mobilfunk und ihre Voraussetzungen lt. ITU (Rysavy-Research, 2009)	25
Tab. 2–3.: Vorgaben der ITU zu IMT-Advanced auf Zellebene (Rysavy-Research, 2009)	25
Tab. 2–4.: GSM-Parameter (Jobmann, 1999)	42
Tab. 2–5.: Typen von GPS-Satelliten (Autor).....	50
Tab. 2–6.: Träger und Codes bei den GPS-Frequenzen (Kahmen, 2006).....	56
Tab. 2–7.: Beispiele von Messmethoden mit GPS (Kahmen, 1997).....	58
Tab. 2–8.: Fehlereinflüsse bei der Pseudostreckenmessung mit GPS (Kahmen, 1997).....	59
Tab. 2–9.: Vergleich der Fehlereinflüsse bei GPS und D-GPS (Thomä, 1996; Kahmen, 1997)	66
Tab. 2–10.: Entfernungsabhängige Genauigkeit von D-GPS (Thomä, 1996; Kahmen, 1997)	66
Tab. 3–1.: Geforderte Genauigkeiten bei der Ortung von Mobilfunkgeräten für E-911 (FCC, 1999).....	72
Tab. 3–2.: Erweiterte Genauigkeitsanforderungen zur Ortung für E-911 (FCC, 2007a; b)	73
Tab. 3–3.: Beispiele von LBS zu unterschiedlichen Standortgenauigkeiten (Wohlert, 2000).....	88
Tab. 3–4.: Vorgeschlagene Genauigkeiten zur Standortbestimmung bei E-112 (Wilde et al., 2004).....	89
Tab. 4–1.: Parameter für das WGS-84 (Seeber, 1989; Hofmann-Wellenhof et al., 2008).....	107
Tab. 4–2.: Transformationsparameter ITRF 93 → MGI (Imrek, 1999)	110
Tab. 4–3.: Parameter für Näherungslösung nach Molodenski ITRF 93 → MGI (Imrek, 1999).....	110
Tab. 4–4.: Eindimensionale Genauigkeitsmaße in der Ortsbestimmung (Bauer, 1997)	116
Tab. 4–5.: Zweidimensionale Genauigkeitsmaße in der Ortsbestimmung (Mil, 1996; Bauer, 1997).....	118
Tab. 4–6.: σ als 2D oder 3D Genauigkeitsmaß (Bauer, 2003; Hofmann-Wellenhof et al., 2008)	118
Tab. 5–1.: Umgebungsmodelle für die Simulationsrechnungen (Lundqvist et al., 1998).....	130
Tab. 5–2.: Simulationsergebnisse im Zuge der Standardisierungsdiskussion (Autor).....	132
Tab. 5–3.: Ergebnisse des Feldversuchs mit OTD (Ruutu, 1998).....	134
Tab. 5–4.: Zusammenfassung früherer Feldversuche mit SnapTrack WAG (Moeglein und Krasner, 1998)	140
Tab. 5–5.: Fehlerquellen bei der „Streckenmessung“ in GSM- und UMTS-Netzen (Hein et al., 2000).....	146
Tab. 6–1.: Auszug aus den Ergebnissen der GPS-Messungen (Autor).....	149
Tab. 6–2.: Genauigkeitsbetrachtungen von Simulationsrechnungen (Autor).....	152
Tab. 6–3.: Beispiele zur Dokumentation von Feldversuchen und Testfeldmessungen (Autor).....	156
Tab. 6–4.: Beispiele zu Genauigkeitsangaben für unterschiedliche Ortsbestimmungsmethoden (Autor)	161

1. Einleitung

1.1. Motivation und These

Ortsabhängige Dienste (*Location Based Services*, LBS) blicken heute mit all ihren einhergehenden Technologien bereits auf eine mehr als 20-jährige Geschichte zurück, bezieht man die Wissenschaft und Forschung aus den Anfängen mit ein. Selten zuvor hat eine Entwicklung so viele unterschiedliche Wissenschaftsgebiete bemüht wie dies bei den LBS der Fall ist. Natur- und Ingenieurwissenschaften, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften, teilweise sogar Geistes- und Humanwissenschaften. Schlagworte wie *Mobilfunk-* und *Satellitennetze*, *mobile Geräte* (Handy, Smartphone, PDA, Navi⁴ etc.), **Ortsbestimmungstechnologien**, *mobile Applikationen* sowie ihre *Datengrundlagen* und *Visualisierungen*, *Userinterfaces* und *Geschäftsmodelle* lassen sich den entsprechenden Disziplinen zuordnen.

In jüngerer Zeit sind vor allem Fragestellungen zu *Datenschutz* und *Privatsphäre* oder speziellen Vorgaben bei Betätigung eines **mobilen Notrufes** (z.B. E-911 in den USA, E-112 und eCall in der EU oder E-119 in Japan), von Interesse. Weiters sollen verschiedene Untersuchungen zum Motivationsverhalten bestimmte LBS zu verwenden, wie z.B. die *Fußgängernavigation* am Smartphone, hier nicht unerwähnt bleiben.

Diese lange Entwicklungszeit bei den LBS war sowohl geprägt von vielen Hoffnungen, als auch permanent von großen Ernüchterungen. Gebär die *Dot-Com-Zeit*⁵, begeistert von einem zunehmend schnelleren Internetzugang per Breitband⁶ und laufend verbesserter Browsertechnologie, ihr neues Modewort **E-Commerce** (*Electronic Commerce*), so weiß man heute, dass die Erwartungen in SET⁷, E-Cash, CyberMoney usw. als große Blase platzten. Viele Start-ups mit unrealistischen Geschäftsplänen sowie durch schnelles Börsegeld kapitalisiert mussten überstürzt in Konkurs gehen und ein damit einsetzender Dominoeffekt zog eine ganze Wirtschaftskrise nach sich (*Durlacher, 2000; legend.at, 2000*).

⁴ Die Begriffe *Handy* (Mobiltelefon), *Smartphone* (Handy, das auch Adressen und Termine verwalten, Fotos aufnehmen usw. kann), *PDA* (Personal Digital Assistant) und *Navi* (Navigationsgerät) sind lt. „Duden – Die deutsche Rechtschreibung“, 25. Aufl., bereits in den deutschen Wortschatz integriert (*Duden, 2010a*) und werden in dieser Arbeit, wenn benötigt, so verwendet.

⁵ Zeitraum Ende der 90er-Jahre sowie Jahrtausendwende.

⁶ Als Beispiel sei hier erwähnt die Einführung der damals neuen ADSL-Technologie über bestehende Telefonleitungen aus Kupfer.

⁷ SET (*Secure Electronic Transaction*) ist ein offenes Protokoll für Kreditkartenzahlungen im Internet, das Mitte der 90er-Jahre von einem Konsortium unter der Federführung von VISA und MasterCard entwickelt wurde und auf besondere Sicherheitsmerkmale setzte. Durch einen umfangreichen Einsatz kryptographischer Verfahren wird ein hohes Maß an Integrität, Authentifizierung und Vertraulichkeit sowohl bei den übertragenen Daten als auch allen beteiligten Parteien gewährleistet (*Haselgrübler und Pozenel, 1999; Wikipedia, 2014s*). Auf Grund der großen Komplexität und der damit verbundenen Kosten konnte sich SET jedoch, mit Ausnahme der Schweiz, nicht wesentlich am Markt verbreiten und hat heute für den E-Commerce keine praktische Bedeutung mehr.

Im Zuge der Standardisierung von GSM, einem der größten technischen Meilensteine in der jüngeren europäischen Entwicklungsgeschichte, versuchte man verlorenes Terrain des E-Commerce durch **M-Commerce** (*Mobile Commerce*, auf mobilen Geräten betrieben) wieder gut zu machen. Dies gelang jedoch trotz Verwendung neuer Technologien wie z.B. WAP (*Wireless Application Protocol*) nicht annähernd (*Riemer, 2000; KPMG, 2001*).

Mobile Geräte, allen voran Handys, später PDAs und Smartphones, waren noch zu unterentwickelt, um *mobile Applikationen* nutzbringend zu etablieren. Die Bedienbarkeit der Geräte über Tasten, Sticks und Sprache war fehleranfällig und kompliziert, die Qualität der Displays hinsichtlich Größe, Auflösung und Farbgestaltung diesbezüglich unbrauchbar. *Mobilfunknetze* wurden, abgesehen von SMS, hinsichtlich Sprachfunk und -qualität optimiert, Datenübertragung gestaltete sich quälend langsam. Die Geschwindigkeiten mussten rapide gesteigert werden, sowohl in den Mobilfunknetzen als auch in der Handhabung der Applikationen auf den Geräten.

Auf Seiten des Mobilfunks wurde durch Einführung technischer Neuerungen ein Niveausprung nach dem anderen erzielt. Beispielsweise bediente sich *HSCSD* einer Bündelung von Kanälen und *GPRS* führte die paketorientierte Übertragung ein, womit eine bessere Kompatibilität mit dem Internet gewährleistet war. Mit *EDGE* wurde die Funkschnittstelle massiv ausgebaut und man sprach zu diesem Zeitpunkt bereits von „2,5 G“-Netzen auf dem Weg zum nächsten großen Meilenstein, der *dritten Generation* im Mobilfunk (*Durlacher, 2001*).

UMTS, als der von Europa favorisierte Teil des „*Mobilfunk-Weltstandards*“ IMT-2000, sollte durch einen gewaltigen Technologieschub neben der mobilen Videotelefonie und MMS vor allem den **mobilen Diensten** zum großen Durchbruch verhelfen. Die entsprechenden Umsatzerwartungen waren anfangs enorm. Dies führte bei Versteigerungsverfahren über die bereitgestellten Frequenzpakete in einigen Ländern der EU zu Erlösen in Milliarden von Eurobeträgen, die vorher nie erwartet worden wären (*Schnabel, 2014a*).

Es lässt sich heute sagen, dass die **UMTS-Einführung** in Europa zu einem beträchtlichen Misserfolg geriet. Die Nachfrage an entsprechenden Geräten und mobilen Diensten war stark überschätzt worden. Es gab für Kunden, bis auf wenige Ausnahmen, keinen entsprechenden und ersichtlichen *Mehrwert* zur gut etablierten und inzwischen durch Konkurrenz günstiger gewordenen GSM-Technologie. Dies hatte zur Folge, dass sich der 3 G-Netzaufbau stark verzögerte, Frequenzpakete zurückgegeben wurden und sich Betreiber aus einzelnen Ländern komplett zurückzogen, um die entstandenen Bilanzverluste zu begrenzen.

Im Schatten dieser Entwicklungen und geprägt von negativer Stimmung war es auf europäischer Ebene sehr schwierig, entsprechende Argumente, besser noch einfache und umsetzbare Geschäftsmodelle, zu finden, um notwendige **Ortsbestimmungstechnologien** in die Mobilfunknetze zu integrieren. Nur so kann aus den mobilen Diensten im Allgemeinen die spezielle Untergruppe der „*location based*“ *Services* (LBS) hervorgehen. Die Forschung und Entwicklung zu Methoden der Ortsbestimmung war zu dieser Zeit schon entsprechend fortgeschritten, sogar mit Verbesserungen hinsichtlich der Genauigkeit in den neuen 3 G-Netzen, jedoch blieb gerade in Europa vieles, teilweise bis heute, ungenutzt liegen⁸. So mancher Wirtschaftsanalytiker, der den darauf neu geprägten Begriff des

⁸ Technologien zur Standortbestimmung in Mobilfunknetzen werden in Europa, abgesehen von den Möglichkeiten der Senderstandorte selbst (Cell-ID), nicht konsequent implementiert. Ortsbestimmung mit mobilen Geräten erfolgt fast ausschließlich durch proprietäre Applikationen mit Hilfe von (A-)GNSS und/ oder WLAN.

L-Commerce (*Location Commerce*) zu vollmundig öffentlich präsentierte, erntete Kopfschütteln, mitunter sogar medialen Spott.

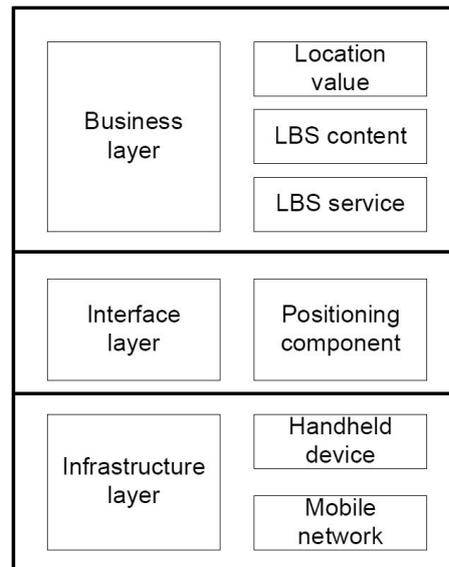
Vieles wurde diskutiert, reflektiert und geschrieben, um dem Ausbleiben des kommerziellen Erfolges bei den LBS mit all ihren Bestandteilen und Grundlagen auf die Spur zu kommen (u.v. (Frank, 1997; Garzik, 2002; Kölmel und Wirsing, 2002; Fritsch und Muntermann, 2005; Navratil und Grum, 2007)). Die Geschichte der LBS war sowohl von vielen Erwartungen als auch von schmerzhaften Enttäuschungen geprägt. Daraus kann die Einsicht gewonnen werden, dass sich diese Materie um vieles komplexer erweist, als lange Zeit angenommen. Forschung und Wirtschaft sind hierbei gleichermaßen mit ständig fortlaufenden Veränderungen konfrontiert.

Es sei diesbezüglich eine *Analogie zum E-Commerce* angedacht aus seiner euphorischen Anfangsphase Ende der 90er-Jahre. Viele der damaligen technologischen und methodischen Mitspieler (wie z.B. E-Cash oder SET) sind seither verschwunden, dennoch erfreut er sich heute in abgewandelter Form einer „kleinen Renaissance“. Z.B. bietet die Recherche nach einem Produkt mit ganz bestimmten Eigenschaften und beschränkt auf eine geographische Region wie Wien, Österreich oder die EU Möglichkeiten des Vergleichs und der Bewertung, wie es sie zur Jahrtausendwende nicht gegeben hat und wie sie der klassische Handel in der Form nicht zur Verfügung stellen kann. Dieser *Nutzen* wird von Kunden gerne angenommen und bewegt direkt in Onlinegeschäften zu bestellen, wenn auch weitere Parameter wie Preis, Zustellung, Garantieleistungen, Zahlungsformen etc. in ihrer Gesamtheit gegenüber einem Ladengeschäft vergleichbar sind.

In ähnlicher Form wird der *L-Commerce*, heute gerne zusammen mit dem Begriff *Mobile Web 2.0* gebracht, eine Wandlung erfahren und es gilt jene Faktoren und Rahmenbedingungen zu finden, die dazu beitragen, dass Kunden sich dessen bedienen (Sauter, 2009). Unabdingbare Voraussetzung für jegliche Art von Location Commerce ist natürlich eine verlässliche und in ihrer Genauigkeit adäquate **Standortbestimmung** des mobilen Kunden.

Netze als eine erste Voraussetzung für LBS, insbesondere Mobilfunk- und globale Satellitennetze, haben mittlerweile einen hohen Standard erreicht. Selbiges gilt für die Entwicklung mobiler Geräte, die mit diesen Netzen kommunizieren können (Abb. 1-1.). Die Diskussion entwickelt sich daher weiter von diesen grundsätzlichen Bedingungen (*Infrastructure Layer*) über die unterschiedlichsten Ortsbestimmungsmöglichkeiten (*Interface Layer*) zu den Bereichen, die die wirtschaftliche Seite eines LBS betreffen (*Business Layer*). In den Vordergrund treten hierbei mobile Applikationen, Datengrundlagen, rechtliche Vorgaben, z.B. zu Datenschutz und Privatsphäre (Zarzer, 2001; Schulzki-Haddouti, 2006; Mohaisen et al., 2008), und vor allem der *Wert* bzw. *Nutzen* für alle Beteiligten, der wichtig ist für den Erfolg eines solchen Dienstes (Wirsing, 2002).

In (Petrova und Wang, 2008) wird dieser Wert als „**Location Value**“ bezeichnet, ihn gilt es zu generieren und zu steigern. Die daraus entnommene Abb. 1-1. zeigt die gesamten Zusammenhänge in vereinfachter Form anhand eines Referenzmodells für LBS im Freien. Es ist also von entscheidender Bedeutung, diesen Location Value mit bestimmten Maßen und Methoden bewerten zu können. In der Literatur werden hierfür insbesondere die **Genauigkeit** und **Qualität der Ortsbestimmung** sowie die **Beschaffenheit des ortsabhängigen Inhalts** zum Zeitpunkt der Anfrage angeführt (u.a. (Wang, B., 2008)).



*Abb. 1-1.: Beispiel eines LBS-Referenzmodells
(Petrova und Wang, 2008)*

Da der Genauigkeit und Qualität bei der Standortbestimmung, als Bedingnis für jegliche Art von Location Based Service, somit eine entscheidende Bedeutung zukommt, sei die **These** dieser Arbeit wie folgt formuliert:

Ein Festlegen der Qualität, insbesondere der Genauigkeit, von Standortbestimmungen für Location Based Services gelingt besser mit methodologischen als fehlertheoretischen Ansätzen. Dies gilt vor allem bei sehr kritischen Diensten wie den mobilen Notruf.

1.2. Vorgangsweise, Inhaltsübersicht und Begriffsfestlegungen

Die These dieser Arbeit erfordert, auf folgende Bereiche näher einzugehen:

- Netze für Location Based Services (Mobilfunk- und Satellitensysteme)
- Funktionsweise von Location Based Services (grundlegende Prinzipien)
- Ortsbestimmungsverfahren für LBS (Methodik sowie Zusammenhang mit der Genauigkeit und Qualität)
- Genauigkeitsangaben für Ortsbestimmungen (verschiedene Maße und gesetzliche Vorschriften bzw. Empfehlungen für den erweiterten mobilen Notruf)
- Koordinatensysteme und Transformationen (Einfluss auf die Genauigkeit)

Den ursprünglichen Einstieg in diese umfangreiche Arbeit bildeten zahlreiche **Interviews** und **Befragungen**, um einen ersten Überblick zu o.a. Bereichen zu schaffen. Dazu wurde unter vielen je ein namhafter Anbieter der mit Ortsbestimmungstechnologien bzw. Mobilfunk befasst war sowie ein Forschungsinstitut bemüht. Stattgefunden haben diese mündlichen Recherchen sowohl bei den jeweiligen Firmen selbst, als auch auf diversen Fachmessen.

Eindruck und Ergebnis dieser Gespräche waren, dass konkrete Erkenntnisse, Auswertungen und schon gar nicht Zahlenmaterial zu diversen Feldtests oder Simulationen bekanntgegeben werden durften, soweit sie nicht schon öffentlich publiziert wurden. Aussendungen solcher Art, oft auch auf den entsprechenden Web-Seiten angeführt, sind jedoch sehr allgemein und meist marketingorientiert gehalten. Entsprechende wissenschaftliche Arbeiten in Zusammenarbeit mit Universitätsinstituten oder anderen Forschungseinrichtungen werden i.d.R. gesperrt, involvierte Personen müssen sich schriftlich verpflichten, kein Know-how nach außen weiterzugeben.

Bewogen durch obige Gründe fiel der Entschluss, in diese Arbeit auch einen **messtechnischen Teil** mit zwei mobilen Satellitenempfängern („Handgeräte“ mit GPS auf CA-Code-Basis) aufzunehmen. Hierbei ergaben sich einige Vorteile und zusätzliche Möglichkeiten, die im Folgenden auch entscheidende Ergebnisse hervorbrachten:

- Das Zahlenmaterial ist authentisch und beruht auf geodätischen Grundlagen. *Fehlermaße* und *Wahrscheinlichkeiten* können somit eindeutig und nachvollziehbar angegeben und visualisiert werden.
- Eine Diskussion der notwendigen bzw. möglichen *Transformationen*, insbesondere hinsichtlich ihres Einflusses auf die Genauigkeit einer Standortbestimmung, ist möglich.
- Es lassen sich Antworten geben auf Fragen wie: Was leistet einfache Ortsbestimmung mit „zivilen“ Satellitentechnologie zu diesem Zeitpunkt (nach Abschaltung der *Selective Availability*)? Gibt es im städtisch verbauten Gebiet überhaupt Lösungen? Wenn ja, ist Satellitenortung eine mögliche Alternative oder Ergänzung zu Mobilfunkmethoden bei der Standortbestimmung und wie sind hierbei die Genauigkeiten zu beurteilen?

Das *Testgebiet* für die GPS-Messungen ist nach keiner bestimmten Repräsentativität ausgewählt worden. Es sollte dicht und mehrere Stockwerke hoch verbaut (geschlossene Bauweise in städtischer Umgebung), teilweise mit Bewuchs (hohe Bäume mit intensiver Belaubung) und mit vermarkten Punkten geodätischer Genauigkeit sowie bekannter Geländehöhe versehen sein. Das Gebiet diente in erster Linie der Ermittlung umfangreicher Messgrößen bei gleichzeitiger Erprobung der Ortsbestimmung mittels GPS-Empfänger und als Visualisierungsgrundlage für unterschiedliche Fehlermaße.

Neben Interviews und Testmessungen wurde auch eine ausführliche **Literaturrecherche** vorgenommen. Diese umfasste wissenschaftliche Arbeiten, Fach- und Lehrbücher, Reports, White Papers sowie zahlreiche Internetseiten mit anschließender Analyse von adäquatem Material. Konkrete Anfragen per E-Mail bei (auch ausländischen) Anbietern von Ortsbestimmungsausrüstung zu gewissen Technologien, Funktionsweisen und Genauigkeitspotentialen wurden teilweise beantwortet mit Hinweisen auf öffentlich zugängliche Homepages oder mit Zusendungen von Präsentationen. Daraus konnte man mitunter (auch „zwischen den Zeilen“) diverse Erkenntnisse beziehen.

Die **Gliederung** dieser Arbeit erfolgte in sieben Kapitel:

Auf *Kapitel 1*, in dem die Motivation und die These formuliert sowie die Vorgangsweise erläutert werden, folgen in *Kapitel 2* Erörterungen der nötigen Grundlagen zu Mobilfunk und Satellitentechnologie, zweitens anhand von GPS als Beispiel für ein GNSS. Das nächste *Kapitel 3* beschäftigt sich mit den Location Based Services, insbesondere den Vorgaben zu den erweiterten mobilen Notrufdiensten in den USA und in Europa (E-911, E-112 und eCall). Weiters vermittelt es eine Systematik zu bestehenden und zukünftigen Ortsbestimmungsmethoden in Mobilfunknetzen. *Kapitel 4* beschreibt notwendige Koordinatensysteme und Transformationen, Fehlermaße, die hauptsächlich in der Ortung und Navigation eingesetzt werden, sowie die durchgeführten Testmessungen mittels GPS.

Kapitel 5 untersucht beispielhaft Simulationsrechnungen für unterschiedliche Ortsbestimmungsmethoden, wie sie in der Literatur dokumentiert sind, vergleicht sie mit Feldversuchen und nennt spezielle Fehlereinflüsse, denen Mobilfunksignale ausgesetzt sind. In *Kapitel 6* werden Angaben aus den vorhergehenden Kapiteln 3 bis 5 vertieft untersucht und gegenübergestellt sowie einige ausgewählte Beispiele zu Genauigkeitsangaben verschiedener Lokalisierungstechniken aus unterschiedlichen Quellen tabellarisch angeführt. Das letzte *Kapitel 7* fasst die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit in Bezug auf die These zusammen und gibt mögliche weiterführende Aufgabenstellungen an.

Um das Kapitel über die eigenen Testmessungen mit zwei GPS-Empfängern (*Kap. 4.3.*) in seinem Umfang schlank zu halten, wurde das systematische Sammelsurium aller Visualisierungen (Streubilder der 10 Stationen, Fotos der Umgebungssituationen sowie die Darstellung der berechneten Fehlermaße auf einer Rasterkarte) in den *Anhang 1* ausgelagert. Weiters sind in *Anhang 2* alle vorgenommenen Berechnungen nebst Messdaten und Ergebnissen belegt. Anhand dieses sehr umfangreichen Zahlenmaterials lassen sich sämtliche durchgeführten Schritte sukzessive nachvollziehen.

Zuletzt seien noch ein paar Anmerkungen zu häufig verwendeten **Begriffen** in dieser Arbeit gemacht. Unter *GPS* (Global Positioning System) ist stets das NAVSTAR-GPS der USA zu verstehen (*Kap. 2.2.*), ansonst ist es speziell erläutert. Die im deutschen Sprachgebrauch vielfältigen Bezeichnungen wie *Ortung*, *Orts-* und *Positions-* bzw. *Standortbestimmung*, *Lokalisierung* und *Positionierung* (im Englischen ist meist von *positioning* oder *localization* die Rede) werden hier weitgehend gleichbedeutend gehandhabt, obwohl in einschlägiger Literatur auch Unterscheidungen angeführt sind.

Eine davon z.B. besagt, dass ein Gerät bzw. System mit dem man *Ortung* betreiben kann, immer mit einem Rückkanal ausgestattet sein muss, um die ermittelten Ortsinformationen weiter bzw. zurück zu senden an den- oder diejenigen, welche eine Ortung initiieren (dafür kann u.a. ein Mobilfunknetz eingesetzt werden (*Schnabel, 2014t*)). Andernfalls ist es als *Orts-* oder *Positionsbestimmungssystem* zu benennen (bzw. als Navigationsgerät), wie z.B. ein autarker GPS-Empfänger. Auch zwischen *Ortung* und *Positionierung* werden, in Anlehnung an ihre Verben, bisweilen Unterschiede postuliert⁹.

⁹ Nach (*Duden, 2010a*): *orten*: die Position, Lage ermitteln, bestimmen; *positionieren*: in eine bestimmte Position bringen, ein Produkt auf dem Markt einordnen.

2. Grundlagen zu Mobilfunk und GNSS

Dieses Kapitel gibt eine Einführung in zwei Bereiche. Einerseits in die Entwicklung und den Aufbau von **Mobilfunk-Netzen** und andererseits in das Global Positioning Systems (GPS) als Beispiel für ein **GNSS** (Global Navigation Satellite System). Im *ersten Abschnitt* werden neben Grundsätzlichem auch Besonderheiten in Mobilfunknetzen angeführt, die für Ortsbestimmungen von wesentlicher Bedeutung sind, und weiters jene Schwierigkeiten aufgezeigt, die entstehen, wenn ein Kommunikationssystem zur Lokalisierung von mobilen Geräten dient (*Kap. 2.1.*). Im *zweiten Abschnitt* werden u.a. auch eine theoretische Qualitätsabschätzung der Ortungsmethode GPS angegeben und auf die Abschaltung der Selective Availability (SA) und dem damit einhergehenden Aufschwung von GNSS-Methoden eingegangen (*Kap. 2.2.*).

2.1. Mobilfunk-Netze

2.1.1. Der Begriff Mobilfunk

Mobilfunk lässt sich in Anlehnung an (*Heine, 1998*) definieren als das funktechnische Übertragen von Nachrichten jeglicher Art zwischen zwei oder mehreren Stationen, von denen zumindest eine beweglich ist. Diese Definition müsste dann jedoch z.B. die Bereiche Rundfunk, Fernsehen und CB-Funk ausschließen, denn auch diese sind im Prinzip Mobilfunksysteme. Der wesentliche Unterschied zwischen diesen Techniken und dem, was heute als **Mobilfunk im engeren Sinne** bezeichnet wird, liegt in der *Voll-Duplex-Fähigkeit*. Voll-Duplex bedeutet, dass bei aktiver Verbindung beide Seiten gleichzeitig Informationen senden und empfangen können. Die bessere Bezeichnung für GSM und verwandte Standards wäre daher „*Mobiltelefonie*“. Da sich aber das Wort „*Mobilfunk*“ als Begriff dafür im deutschen Wortschatz bereits etabliert hat¹⁰, wird es auch in dieser Arbeit weiterverwendet.

Nach (*Walke, 2000*) können folgende **Mobilfunksysteme** unterscheiden werden (*Abb. 2-1.*):

- **Öffentliche zellulare Mobilfunksysteme** (*Public Land Mobile Network, PLMN*) wie z.B. GSM, UMTS und LTE, wobei darunter Funknetze verstanden werden, die den Fernsprechtsdienst leitungsgebundener Netze flächendeckend auf mobile Teilnehmer ausdehnen.

¹⁰ *Mobilfunk* wird in (*Duden, 2010a*) als „Funk zwischen mobilen oder zwischen mobilen und festen Stationen“ beschrieben.

- **Bündelfunksysteme** (z.B. TETRA) sind auf kommerzielle Anwendungen hin optimiert und als Dienst in geschlossenen Benutzergruppen, wie z.B. Unternehmen mit mobilen Außendienstmitarbeitern oder Blaulichtorganisationen, in Gebrauch. Sie ermöglichen in einem örtlich durch die Sendeleistung der Feststation begrenzten Bereich Sprach- und/oder Datenkommunikation mit einer Zentrale oder zwischen mobilen Teilnehmern abzuwickeln.
- **Funkrufsysteme** gestatten den gezielten Aufruf von Teilnehmern mit mobilen, kleinen Empfängern (Pagern) durch die Übertragung eines Signals oder einer kurzen Nachricht. Der gerufene Teilnehmer kann den Ruf zwar empfangen, jedoch mit seinem Empfänger nicht antworten.
- Unter dem Begriff **schnurlose Kommunikationssysteme** (z.B. DECT) werden die Dienste und Anwendungen zusammengefasst, die auf Funk-Telefonen beruhen. Hierbei wird im Prinzip lediglich das Kabel zwischen dem Fernsprengerät und dem Hörer durch eine Funkstrecke ersetzt, die eine bis zu ca. 300 m bzw. 50 m weite Verbindung ermöglicht, je nachdem ob außerhalb oder innerhalb von Gebäuden.
- Dem steigenden Bedarf nach Beweglichkeit von Arbeitsplatzrechnern tragen **drahtlose lokale Funknetze** (z.B. solche der WLAN-Gruppe) Rechnung, während eine globale Kommunikation und Erreichbarkeit mit **mobilen Satellitenfunksystemen** wie z.B. IRIDIUM möglich ist.

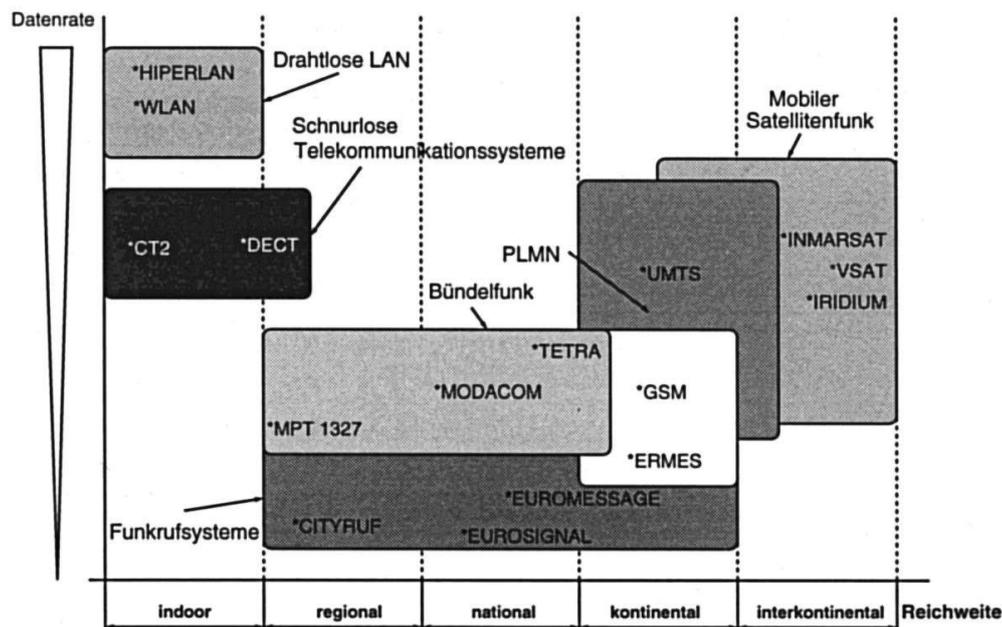


Abb. 2-1.: Unterschiedliche Mobilfunksysteme (Walke, 2000)

Unter den Funksystemen, die in erster Linie der *Datenübertragung* dienen, ist der klassische öffentliche Mobilfunk (PLMN) von der geographischen Ausdehnung her betrachtet zu den **Wide Area Networks** (WAN) zu zählen. Im Vergleich dazu stehen die **Metropolitan Area Networks** (MAN) mit Standards wie z.B. WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*, auch HiperMAN genannt) mit einer Reichweite bis zu 5 km bei nomadischer Nutzung (WiMAX mobile, IEEE 802.16 e) und 15 km bei fester Außenantenne (WiMAX fixed, IEEE 802.16 d).

Eine wesentlich geringere Reichweite besitzen die **Local Area Networks** (LAN), zu denen z.B. das bekannte *Wireless LAN* (WLAN) nach IEEE 802.11 samt Weiterentwicklungen zählt. Es kann ca. 50 m in Betongebäuden und bis zu einigen 100 m im Freien überbrücken. Kurzbereichsfunk wie *Bluetooth* (IEEE 802.15.1), *Ultrawideband* (UWB, IEEE 802.15.3 a, auch als „Wireless USB“ bezeichnet), *NFC* (*Near Field Communication*) und *RFID* (*Radio Frequency Identification*) zählen zu den **Personal Area Networks** (PAN) mit Reichweiten von 10-20 cm (NFC), wenigen Zentimetern bis wenigen Metern bei RFID und je nach Generation, Leistungsklasse und Sichtverbindung ca. 5-500 m bei Bluetooth (u.a. (Schnabel, 2014f; n; y)).

In all diesen Funknetzen mit ihren ganz bestimmten Eigenheiten und Ausdehnungen lassen sich mit unterschiedlichsten Methoden **Ortsbestimmungen** durchführen (Kap. 3.3.). Die Betrachtungen dieser Arbeit beschränken sich jedoch vorwiegend auf den Bereich der *öffentlichen, zellularen Mobilfunknetze* wie GSM, UMTS und LTE und den hiermit möglichen Techniken.

2.1.2. Die Entwicklung des Mobilfunks als Grundlage für Location Based Services

Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Funktechnik bringen laufend neue Erkenntnisse und Methoden, um Sprache und Daten möglichst effizient, fehlerfrei und schnell über das Medium Luft zu übertragen. Da die Nachhaltigkeit dieser Ergebnisse auch von wesentlicher Bedeutung für die *Qualität einer Ortsbestimmung* in Mobilfunknetzen ist, sei hier ein Abriss der fortschreitenden Entwicklung des Mobilfunks, mit dem Schwerpunkt für Österreich und Deutschland, gegeben.

2.1.2.1. Die analogen Wurzeln des Mobilfunks

Die Technologie des Mobilfunks hat heute eine Entwicklungsgeschichte von über 80 Jahren. Bereits 1926 führte die Deutsche Reichsbahn auf der Strecke Berlin – Hamburg erfolgreiche Versuche durch. Ein erstes tragbares Funkgerät, mit einem Gewicht von 17,5 kg und einer Gesprächszeit von rund 8 Minuten mit einer Akkuladung, wurde 1946 in den USA vorgestellt. Das erste *öffentliche Mobilfunksystem*, das über ein Mobilteil Funksignale übermittelte, wurde in den 50er-Jahren ebenfalls in den USA installiert (Jobmann, 1999).

Diese amerikanischen Mobilfunknetze waren einfache analoge Systeme (**IMTS**, *Improved Mobile Telephone System*), die über *kein Zellensystem* verfügten und somit zur „**Generation 0**“ (0G) des zellularen Mobilfunks zählen (Hogrefe, 2005). Ein Nachfolger mit weiter Verbreitung war der Standard **AMPS** (*Advanced Mobile Phone Service*), der ursprünglich von AT&T in den 70er-Jahren entwickelt wurde (Abb. 2–3.). Das erste wirklich mobile AMPS-Handy war das DynaTAC 8000X (*Dynamic Adaptive Total Area Coverage*, Abb. 2–2.), das von Motorola am 13. Juni 1983 auf den Markt gebracht wurde (Borchers, 2008).

Ab 1988 wurde AMPS von der TIA (*Telecommunications Industry Association* der USA) weiterentwickelt und nutzte dann das 800 Mhz Band sowie das Zugriffsverfahren FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). Damit zeichnete sich der Standard in Amerika zu der Zeit mit hoher Kapazität

und Zuverlässigkeit aus, konnte sich stark verbreiten und zählte zur **Generation 1** (1 G) der zellularen Mobilfunknetze. Weiterentwicklungen von AMPS führten zu **N-AMPS** (*Narrowband Advanced Mobile Phone Service*) mit einer noch höheren Kapazität und später zu **D-AMPS**, bereits als digitale Erweiterung (2 G). Damit war die Entwicklung von AMPS weitestgehend beendet, da AT&T Wireless (als Nachfolger von AT&T) 2002 beschloss, seine Netze auf GSM mit GPRS umzustellen und die anderen AMPS-Netzbetreiber diesem Vorgehen folgten (*Wikipedia, 2014c*).

In Deutschland war es ab 1952 möglich, einen Teilnehmer mit einem *mobilen Endgerät* von einem Festnetzanschluss aus anzurufen. Fortschreitend kamen neue **lokale Funksysteme** hinzu mit folgenden Merkmalen. Es wurden nur *inselartige Funkstationen* in einem Gebiet, vornehmlich in Städten, mit Umfang von 20 bis 100 km aufgebaut. Etwa 20 Teilnehmer teilten sich einen Sprechkanal, wobei die *Vermittlung per Hand* (über ein Amt) erfolgte, Routingprozesse im heutigen Sinne gab es nicht. In den Funktelefonen waren noch Röhrenverstärker eingebaut, die Geräte waren sehr groß, schwer und teuer und wurden hauptsächlich in Fahrzeugen verwendet (*Schnabel, 2014e*).



Abb. 2–2.: DynaTAC 8000X (*Wikipedia, 2014c*)

1958 beschloss die Deutsche Bundespost, diese bereits vorhandenen, jedoch lokal begrenzten, Funktelefonnetze zu einem Gesamtnetz zusammenzuschließen und so entstand das erste öffentliche Mobilfunknetz in Deutschland, das **A-Netz** (*Tab. 2–1.*). Es war bis 1977 im Bereich von 150 MHz in Betrieb und hatte eine *maximale Teilnehmerzahl* von ca. 10.000. Wollte man in diesem Netz einen Mobilteilnehmer erreichen, so musste bekannt sein, in welcher der 137 *geographischen Rufzonen* er sich befand (*Jobmann, 1999*). Eine Funkzone hatte einen Durchmesser von etwa 30 km, ein Handover zur nächsten Zone (*Kap. 2.1.4.3.*) war nicht möglich und es gab auch kein Roaming in andere Netze.

Getrieben von der starken Nachfrage und den technischen Unzulänglichkeiten des A-Netzes, entwickelte man bereits frühzeitig ein Nachfolgesystem, welches ab dem Jahre 1972 in Deutschland, Österreich, den Niederlanden und Luxemburg unter dem Namen **B-Netz** eingeführt wurde (*Tab. 2–1.*). Es unterstützte *vollautomatische Vermittlung* von kommenden und gehenden Rufen der Mobilstationen und ein *Roaming* zwischen den vier beteiligten Ländern. Bei Anrufen ins Mobilnetz musste man jedoch immer noch den Aufenthaltsbereich des Mobilteilnehmers (die Rufzone) wissen, um ihn anwählen zu können. Wenn ein Mobilteil den Versorgungsbereich seiner Funkstation verließ, wurde die Verbindung unterbrochen, es fand kein Handover zu einer angrenzenden Zone statt (*UMTSlink, 2009b*). Das B-Netz wurde ebenfalls im 150 MHz-Bereich betrieben, umfasste in Österreich ca. 1.800, in Deutschland 27.000 Teilnehmer und zählte wie das A-Netz zur **Generation 0** des zellularen Mobilfunks (*Sokolov, 2004*).

Die ersten analogen Mobilfunknetze hatten den Nachteil, dass sie auf Grund der verwendeten Technik und des begrenzten Frequenzspektrums nur für eine geringe Teilnehmerkapazität ausgelegt wa-

ren. Während bereits in den 60er Jahren z.B. von den Bell Labs in den USA theoretische Grundlagen für *Mehrwegeausbreitung* und *zellulare Systeme* entwickelt wurden, kamen die entscheidenden Impulse für den tatsächlichen Aufbau aus Skandinavien. Dort entwickelten Televerket und Ericsson das skandinavische Mobilfunksystem im Frequenzbereich von *450 MHz*, welches Ende 1981 mit der Bezeichnung **NMT-450** (*Nordic Mobile Telephone System*) eingeführt und 1986 mit **NMT-900** erweitert wurde (Tab. 2-1., Abb. 2-3.). Beide Systeme zählen bereits zur **1. Generation** des zellularen Mobilfunks mit der Fähigkeit zu einem *Handover* zwischen benachbarten Zellen (Jobmann, 1999; UMTSlink, 2009b).

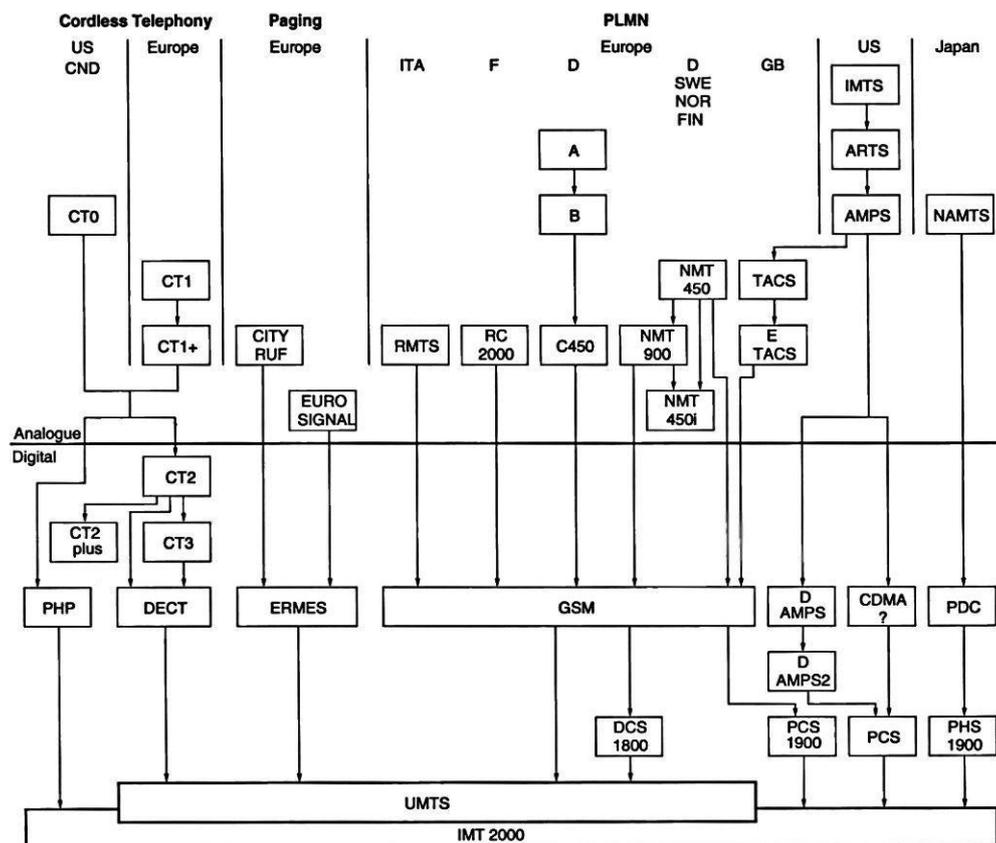


Abb. 2-3.: Analoge und digitale Standards bei Mobilfunksystemen (Walke, 2000)

In Österreich wurde auf Basis des NMT-450-Standards das **C-Netz** als *Autotelefonnetz* im November 1984 in Betrieb genommen (Tab. 2-1.) und arbeitete erfolgreich bis Ende 1997 (Mobilkom, 2000a). Es war für etwa 50.000 Teilnehmer ausgelegt und die Geräte wurden anfangs in Koffern mit bis zu 18 kg transportiert. In Deutschland ergänzte das C-Netz (auch **C-450** genannt) ab 1986 das bestehende B-Netz. Es konnte bis ca. 800.000 Teilnehmer aufnehmen und wurde erst am 31.12.2000 abgeschaltet (Schnabel, 2014c). In diesen Netzen war ein automatisches und unterbrechungsfreies *Handover* beim Wechseln der Funkversorgungszelle möglich. Ein Roaming zwischen den C-Netzen der einzelnen Länder (so wie beim B-Netz) funktionierte jedoch nicht, da die Mobilfunksysteme zueinander inkompatibel waren (Wikipedia, 2014c).

Das **D-Netz** wurde in Österreich am 1. November 1990 in Betrieb genommen (Tab. 2-1.). Es arbeitete nach dem britischen **TACS**-Standard (*Total Access Communication System*), war noch ein

analoges Netz, besaß eine Kapazität von bis zu 100.000 Teilnehmern und wurde trotz gültiger Lizenz bis 2006 am 28.02.2002 eingestellt. TACS ist die europäische Version von AMPS. Es verwendet ein anderes Kanalaraster, das *900 MHz*-Band und zählt auch zur **1. Generation** des zellularen Mobilfunks. Mit **E-TACS** wurde TACS durch mehr Kanäle erweitert. Beide Standards, die die am weitesten entwickelten analogen darstellten und neben Großbritannien auch noch in Italien und Spanien im Einsatz waren, wurden später durch GSM abgelöst (*Mobilkom, 2000a*).

Im Gegensatz zum Autotelefonnetz (C-Netz) konnte man im D-Netz erstmals mit kleinen portablen Handapparaten (*Handys*) telefonieren und es wurde von Anfang an auf die Funkversorgung im Inneren von Gebäuden geachtet. In Österreich diente das D-Netz somit der Modernisierung des analogen Mobilfunkstandards bis zur Einführung der digitalen Netze, während in Deutschland die Bezeichnung D-Netz bereits für die GSM-900-Netze stand (*Tab. 2-1.*). Die analogen C- und D-Netze unterstützten eine *vollautomatische Mobilitätsverwaltung*, so dass die **Aufenthaltsorte der eingeschalteten Endgeräte** laufend aktualisiert und die Teilnehmer bei eingehenden Rufen automatisch gefunden wurden. Dies stellte somit die „Urform“ der *Standortbestimmung von Mobilfunkgeräten* dar, auch wenn die Genauigkeit mit Zelldurchmessern von mehreren Kilometern sehr gering war und mit der einfachen Methode Cell-ID in Europa bis heute immer noch ist (*Kap. 3.3.2.*).

2.1.2.2. GSM und WAP – digitale Systeme für mobile Dienste

Die ersten *digitalen* zellularen Mobilfunksysteme werden zur Unterscheidung von den *analogen* auch Systeme der **2. Generation** (2G) genannt und basieren auf der *DCS-Technik* (Digital Cellular System). Das erste digitale Netz in Österreich (**GSM-900**) wurde im Dezember 1994, damals noch unter der Bezeichnung **E-Netz**, später A1 genannt, von der Mobilkom Austria in Betrieb genommen (*Tab. 2-1.*). 1996 folgte ein weiteres GSM-900-Netz von max.mobil. (ursprünglich Ö-Call, heute von T-Mobile übernommen), 1998 ein **DCS-1800**-Netz von ONE (damals Connect Austria, heute von Orange und weiters von Drei übernommen) und 2000 von tele.ring (heute noch eine eigene Marke, aber zu T-Mobile gehörig). Alle (ursprünglich) vier Betreiber mussten jeweils eine österreichweite Versorgung gewährleisten (u.a. (*Sokolov, 2004*)).

DCS-1800 ist die gebräuchlichere Bezeichnung für GSM-1800 und benutzt modifizierte Standards von GSM im Frequenzbereich um 1800 MHz (*Tab. 2-4.*). Zur Entlastung der überbelegten 900er-Funkzellen bekamen die Mobilkom und max.mobil. im Mai 2001 Frequenzen im 1800er-Band für regional begrenzte Bereiche zugesprochen¹¹ und konnten somit im Großstadtbereich durch *Dualbandnetze* mit *kleineren Zellen* und höheren Kapazitäten ihre Qualität wesentlich verbessern (*UMTSlink, 2009e*). Im Hinblick auf die *Ortsbestimmung in zellularen Mobilfunknetzen* (*Kap. 3.3.2.*) ermöglichte DCS-1800 eine **erste Genauigkeitssteigerung**, da wegen der größeren Signaldämpfung in diesen Netzen die Zellradien auf ca. ein Viertel gegenüber GSM-900 verringert werden müssen¹².

In Deutschland wurde bereits 1991 das erste GSM-900-Netz eingeführt (*Tab. 2-1.*). Es hat die Bezeichnung **D1-Netz** und wird von T-Mobile, einer Tochter der Deutschen Telekom betrieben. 1993 wird aufgrund der Deregulierung des Mobilfunks in Europa das **D2-Netz** gestartet, Betreiber ist

¹¹ In Wien, Wien-Umgebung, Graz, Linz, Salzburg und im Rheintal.

¹² Es sind dadurch Zell- bzw. Sektorradien von maximal 8 km möglich.

Mannesmann Mobilfunk, heute zum Vodafone-Konzern gehörend. Die GSM-1800-Netze in Deutschland werden mit **E1 / E2** bezeichnet, 1994 bzw. 1998 eröffnet und von E-Plus bzw. Viag-Interkom (heute O2) betrieben (*Jobmann, 1999*).

Der Erfolg des Standards **GSM** war europa- und später auch weltweit enorm und die Technik wurde laufend weiterentwickelt. Da Mobilfunknetze a priori für die *Übertragung von Sprache* entstanden sind, bemühte man sich besonders, deren Qualität zu verbessern. Für eine optimale Sprachübertragung in digitalen Netzen benötigt man eine Bandbreite von *64 kBit/s*. In GSM-Netzen steht dafür aber nur eine Nettorate von *13 kBit/s* zur Verfügung. Daher wird das Sprachsignal mit bestimmten **Codecs** komprimiert und codiert (*Schnabel, 2014u*). Dies brachte die ersten Techniken hervor, mit denen mehr Daten über ein Sprachsystem übertragen werden konnten, als der ursprüngliche Standard und Zweck vorsah.

In GSM-Netzen wird bei der Codierung mit **EFR** (*Enhanced-Fullrate*) das beste Ergebnis erzielt, gefolgt von FR (*Fullrate*) und HR (*Halfrate*). In gemischten UMTS- und GSM-Netzen steht mit **AMR-WB** (*Adaptive Multi Rate WideBand*) ein neuerer, standardisierter Sprachcodec zur Verfügung, der nochmals eine Verbesserung erzielen konnte und der mittlerweile auch für Klingeltöne und Sprachnotizen eingesetzt wird (*Schnabel, 2014u*).

Weitere Entwicklungen bei GSM brachten z.B. Leistungsmerkmale wie *Anklopfen* und *Faxübertragung* (1995 in der zweiten Phase spezifiziert) sowie den sehr wichtigen Bereich der *Datendienste* in **Phase 2+**. Da Mobilfunknetze grundsätzlich nicht zur Datenübertragung entworfen wurden, bedurfte es jedoch spezieller Erweiterungen, um in Zeiten des Internets und mobiler Anwendungen, im speziellen für **Location Based Services** (*Kap. 3.2.*), die Übertragungsraten zu erhöhen und die Latenzzeiten zu senken (*Sauter, 2009; 2011*).

Ursprünglich konnten in einem GSM-Netz Daten nur mittels **CSD** (*Circuit Switched Data*), einem *leitungsvermittelten Verfahren*, und **SMS** (*Short Message Service*), dem Kurzmitteilungsdienst, beschränkt auf 160 Zeichen pro Mitteilung, übertragen werden. Die Nutzdatenrate bei CSD war jedoch auf maximal *9,6 kBit/s* beschränkt und wurde in Phase 2 auf Kosten der Fehlerkorrektur und durch verbesserte Codierungsmethoden auf *14,4 kBit/s* erhöht. Die GSM-Phase 2+ ermöglichte hierauf die Bündelung mehrerer Kanäle (*Zeitschlitz*). Dies führte zur Verabschiedung neuer Datenübertragungsstandards, die medial mitunter auch als „**2,5 G**“ bezeichnet wurden (*Schnabel, 2014d*).

Der erste von diesen war **HSCSD** (*High Speed Circuit Switched Data*) als *leitungsvermittelter Verfahren*. Es war vom Netzbetreiber relativ einfach zu implementieren, wurde nach Verbindungszeit abgerechnet und lieferte je nach Anzahl der gebündelten Kanäle und den Möglichkeiten der damals eingesetzten Geräte Raten bis zu (theoretischen) *43,2 kBit/s* im Downlink (3 Kanäle) und *28,8* im Uplink (2 Kanäle). HSCSD wurde nicht von allen Netzbetreibern angeboten, in Österreich nur von ONE seit Ende Dezember 1999 (*Tab. 2-1.*) und in Deutschland von E-Plus, ebenfalls seit Ende 1999, und Vodafone (D2), seit November 2000 (*Schnabel, 2014j*).

HSCSD konnte sich am Markt jedoch mangels verfügbarer Geräte und zugunsten des nächsten Standards GPRS nicht umfangreich verbreiten (*UMTSlink, 2009f*). Die Idee einer konsequenten „*Kanalbündelung*“ wird jedoch ca. 15 Jahre später unter der Bezeichnung „*Carrier Aggregation*“ als wesentliche Technik für **LTE-Advanced** wieder aufgegriffen und gilt als eine der wichtigsten Kerntechnologien für Mobilfunknetze der 4. Generation und darüber hinaus (*Kap. 2.1.2.4.*).

Zeit / Einführung	Land	Netze, Standards und Bezeichnungen	„Generation“
1958 – 1977	D	A-Netz, analog	0 G
1972 – 1995	D	B-Netz, analog	0 G
1974 – 1995	A	B-Netz , analog	0 G
1981	Skandinavien	NMT-450, analog	1 G
1984 – 1997	A	C-Netz , analog, Autotelefon	1 G
1984	GB	TACS, analog	1 G
1986	Skandinavien	NMT-900, analog	1 G
1986 – 2000	D	C-Netz (C-450), analog	1 G
1990 – 2002	A	D-Netz (TACS), analog	1 G
1991 – 2016	D	D1-Netz, digital, GSM-900	2 G
1994 – 2015/34	A	E-Netz, digital, GSM-900	2 G
1994	D	E1-Netz, digital, GSM-1800	2 G
1997	USA	PCS-1900, digital	2 G
1998	A	GSM-1800	2 G
1999	A	WAP (über GSM)	2 G
1999	A	HSCSD	2,5 G
2000	A	GPRS	2,5 G
2001	Japan	UMTS	3 G
2003	A	UMTS	3 G
2004	D	UMTS	3 G
2005	A	EDGE (E-GPRS)	2,75 G (tlw. 3 G)
2006	A	HSDPA	3,5 G (B3G)
2007	A	HSUPA (HSPA)	3,5 G (B3G)
2009	A	HSPA+ (HSPA Evolution, I-HSPA)	3,75 G (B3G)
2010	A	LTE (HSOPA, Super 3G)	3,9 G (tlw. 4 G) ¹³
2015	A	LTE-Advanced (LTE-A, LTE+)	4 G (tlw. 4,5 G, 4 G+)

Tab. 2–1.: Übersicht zur zeitlichen Entwicklung des Mobilfunks (Autor)

GPRS (*General Packet Radio Service*) ist eine Mobilfunktechnik, die in GSM-Netzen eine schnellere, aber vor allem *effizientere Datenübertragung* ermöglicht und dementsprechend eine umfangreiche Erweiterung der bestehenden Mobilfunknetze mit zusätzlichen Elementen erforderte. GPRS gehört zu den *paketerorientierten Übertragungstechniken*, die, im Gegensatz zu den verbindungsorientierten wie CSD und HSCSD, einen Übertragungskanal mehreren Teilnehmern zuweisen und die zu übertragenden Daten, zerteilt in kleine Pakete, auch über mehrere Kanäle gleichzeitig senden können (Schnabel, 2014h).

Mit diesen Techniken werden Leerzeiten auf einzelnen Kanälen vermieden, die Funkkapazität einer Zelle besser ausgeschöpft und die Möglichkeit geboten, nach übertragener Datenmenge anstatt der Verbindungszeit abzurechnen. Darüber hinaus erlaubt GPRS die *gleichzeitige Nutzung von Telefonie und Datenübertragung*. Dank IP-Technik kann der Netzbetreiber einen vereinfachten Zugriff auf Datennetze wie das Internet anbieten und tritt somit gleichzeitig als Sprach- und Datendienstleister auf. Dies ist z.B. für **Location Based Services** von großem Vorteil (Eberspächer et al., 2001).

¹³ Nach ITU-Definition entspricht LTE gemäß dem „Einführungsstandard“ des 3GPP (R8) nicht der vierten Generation (4G) des Mobilfunks (Tab. 2–2.). Die ITU sieht auch keine „unterteilten“ Generationen vor (wie z.B. „3,5G“ usw.), dies sind ausschließlich Bezeichnungen des Marketings und der allgemeinen medialen Berichterstattung.

Die Übertragungsrate bei GPRS hängt vom eingesetzten *Kodierungsschema* (KS, je nach Qualität der Funkübertragung), der Anzahl der vom Netz zugeteilten *Zeitschlitz* (ZS, je nach Zellenauslastung) und den Fähigkeiten des eingesetzten Endgerätes ab. Sie betrug Mitte der 2000er-Jahre typischerweise bis zu *53,6 kBit/s* im Downlink (KS-2, ZS: 4), in der Praxis waren jedoch im Schnitt meist nur *40 kBit/s* erreichbar. Dies entsprach in etwa der Geschwindigkeit eines analogen Telefonmodems nach dem Standard V.90.

Am 2. August 2000 hat die Mobilkom Austria in Österreich nach eigenen Angaben (*Mobilkom, 2000a*) das weltweit erste flächendeckende GPRS-Netz auf Basis von GSM-900 in Betrieb genommen (*Tab. 2–1.*). In Deutschland boten seit April 2001 alle vier Mobilfunkprovider GPRS in ihren Netzen an (*UMTSlink, 2009c; Wikipedia, 2014h*).

WAP verbreitet sich auf der Grundlage von GPRS

GPRS war jene Übertragungsart, die auf Grund ihrer Paketorientierung und Geschwindigkeit der bereits 1997 vom WAP-Forum standardisierten **WAP-Technologie** (*Wireless Application Protocol*) eine entsprechende Verbindung mit dem Internet bot. GPRS stellt somit einen Meilenstein in der Entwicklung *mobiler Dienste* dar und bereitete den Weg für die speziellen *standortbezogenen Dienste* (LBS, *Kap. 3.2.*), die meist auch für ihre Ortsbestimmung Daten aus dem Inter- bzw. Mobilfunknetz benötigen. Obwohl WAP bereits mit CSD und HSCSD arbeitete, konnte sich der Standard erst mit GPRS und den 1999 veröffentlichten Erweiterungen WAP 1.1 und 1.2 am Endgerätemarkt entscheidend verbreiten (*Schnabel, 2014x*).

WAP bezeichnet eine *Sammlung von Protokollen und Spezifikationen*, die die Übertragung von Internetinhalten zu kleinen mobilen Endgeräten ermöglicht und die Darstellung auf den Displays optimiert. Im Gegensatz zu PCs haben mobile Geräte wie Handys, PDAs und Smartphones eine wesentlich knappere Ausstattung, besonders wenn man sich an die Verhältnisse Ende der 90er-Jahre erinnert:

- kleines Display mit geringer Auflösung (damals noch monochrom)
- geringe Rechenleistung und Speicherkapazität
- eingeschränkte Bedienungselemente
- geringe Übertragungskapazität im Mobilfunknetz

Zudem sollte bei der Kodierung der Internetinhalte die offene Struktur und Lesbarkeit einer Auszeichnungssprache (Markup Language) beibehalten und die Menge der zu übertragenden Daten reduziert und komprimiert werden. Die Lösung gelang durch **WML** (*Wireless Markup Language*), dem Gegenstück zu HTML (*Hypertext Markup Language*) für den klassischen Internet-Browser. WML wird im ASCII-Format geschrieben und gespeichert, auf einem *WAP-Gateway* (Proxy) in ein Binärformat kompiliert (**WMLC**, *Wireless Markup Language Compiled*) und dann erst über das Mobilfunknetz an den *WAP-Client* (Microbrowser) im Endgerät übertragen (*Eberspächer et al., 2001*). Bei der Verwendung der Technologie auf der Funkstrecke ist WAP sehr flexibel spezifiziert, möglich sind GSM mit SMS, CSD, HSCSD, GPRS, EDGE ebenso wie UMTS, HSPA und andere zukünftige Netze.

Der WAP-Standard (ab 1.2) unterstützt auch einen *Push-Service*, der es erlaubt, Nachrichten ohne Anforderung an den WAP-Client zu senden. Weiters wird WAP als Basistechnologie für **MMS** (*Multimedia Messaging Service*) genutzt, d.h. sowohl das Senden als auch Empfangen einer MMS basiert auf WAP. Mit der Spezifikation von **WAP 2.0** wurden einige ursprüngliche WAP-Protokolle durch HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) und SSL (*Secure Socket Layer*) zur Verschlüsselung ersetzt. Auch schuf man die Möglichkeit unter Umgehung des WAP-Gateways direkt mit einem Web-Server zu kommunizieren. Dies brachte zwar eine Vereinfachung des Zugriffs auf das Internet, erhöhte aber die zu übertragende Datenmenge beträchtlich. Darum machte WAP 2.0 erst über UMTS bzw. GSM mit der Erweiterung EDGE wirklich Sinn (*Kap. 2.1.3.2.*), ermöglicht dafür aber bereits umfangreichere *mobile Services*. Endgeräte für diesen WAP 2.0-Standard kamen erst Anfang 2004 auf den Markt (*Wikipedia, 2014x*).



Mit der Dot-Com Euphorie und dem E-Commerce Hype Ende der 90er-Jahre wurden in die WAP-Technologie große wirtschaftliche Erwartungen gesetzt. Diese konnten jedoch aus vielerlei Gründen nicht erfüllt werden. Dazu zählen, aus technischer Sicht, die lange Zeit sehr niedrigen Übertragungsraten, ein mangelndes Userinterface mit zu kleinem Monochromdisplay und zu niedriger Auflösung, sowie lange Lieferverzögerungen. *Abb. 2–4.* zeigt das Mobiltelefon Nokia 7110, welches *weltweit das erste WAP-fähige Gerät* war, Ende 1999 auf den Markt kam und u.a. wegen seinem „großen“ grün-schwarzen Display mit einer Auflösung von 96 x 65 Pixel und der Navi-Roll-Taste stark beworben wurde.

*Abb. 2–4.: Mobiltelefon Nokia 7110
(Wikipedia, 2014p)*

2.1.2.3. UMTS – die dritte Generation im zellularen Mobilfunk

Um die ersten enttäuschten Gehversuche im *M-Commerce* beruhend auf GSM, GPRS und WAP wieder auszugleichen, setzte man immense Hoffnungen in die nächste Mobilfunkgeneration. Neue Frequenzressourcen, integrierte Sprach- und Datenanwendungen, hohe Datenraten und ein einheitlicher Standard sollten Internet-Applikationen mobil machen, wirtschaftlichen Erfolg bringen und auch den *ortsabhängigen Diensten* (LBS, *Kap. 3.2.*) zum Durchbruch verhelfen. In einigen Ländern Europas waren die Mobilfunkanbieter offensichtlich von diesem Erfolg dermaßen überzeugt und beflügelt, dass bei den Versteigerungen von UMTS-Frequenzen astronomische Summen geboten wurden¹⁴.

Obwohl ursprünglich erwartet wurde, dass in Europa die ersten Mobilfunknetze der **3. Generation** (3G) ab dem Jahre 2002 in Betrieb gehen würden, war es in Österreich mit der Mobilkom Austria erst am 25. April 2003 kommerziell soweit (*Tab. 2–1.*) und in Deutschland mit Vodafone am 16. Februar 2004 (*UMTSlink, 2009e*). Das Platzen der Dot-Com-Blase und die darauffolgende Wirtschaftskrise verzögerten den Aufbau der Netze wesentlich und es mangelte an verfügbaren Endgerä-

¹⁴ Z.B. zahlten im August 2000 in Deutschland sechs Bewerber für zwölf gepaarte und fünf ungepaarte Frequenzträger (*Kap. 2.1.3.2.*) in Summe rund 99,4 Milliarden DM (ca. 50 Mrd. Euro). In Österreich belief sich der Betrag für die UMTS-Lizenzen im November 2000, ebenfalls für sechs Anbieter, nur mehr auf etwa 700 Millionen Euro (*Schnabel, 2014o*).

ten und leistbaren Tarifmodellen. Einzig in Japan erfolgte ein zügiger Aufbau und Start der UMTS-Technologie, da bereits Engpässe in den Netzen der 2. Generation zu befürchten waren. Somit wurde von NTT DoCoMo in und um Tokio das *weltweit erste kommerzielle UMTS-Netz auf W-CDMA-Basis* bereits am 1. Oktober 2001 in Betrieb genommen (Walke et al., 2002).

Erschwerend kam hinzu, dass die technische Entwicklung von **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunication System*) unter komplizierten Bedingungen stattfand, da es nur ein Teil einer ganzen Familie von Mobilfunksystemen der 3. Generation ist. Diese versuchte man durch Standardisierung kompatibel zu machen, scheiterte letztendlich aber aus politischen und wirtschaftlichen Gründen daran. **IMT-2000** (*International Mobile Telecommunication at 2000 MHz*) ist der Dachbegriff dieser Familie, die ursprünglich aus der Initiative „*Future Public Land Mobile Telecommunication System*“ (FPLMTS) hervorging und einen Spezifikationspool darstellt, der 1992 von der ITU vorgegeben wurde (Walke et al., 2002).

Bereits Ende der 1980er Jahre hat die **ITU-R** (*International Telecommunications Union – Radiocommunication*, (ITU-R, 2014b)) einen Anforderungskatalog festgeschrieben, was von 3G-Systemen in Zukunft erwartet wird. Weltweit gab es 10 Vorschläge, wie man ein solches System technisch umsetzen könnte, wovon durch die ITU bis zum Jahre 1998 sechs in die Familie IMT-2000 aufgenommen und Frequenzen im 2-GHz-Bereich hierfür reserviert wurden (Walke et al., 2002). Diese 6 Entwürfe lassen sich im Wesentlichen in 4 Kategorien mit zwei Kerntechnologien einteilen (Abb. 2–5).

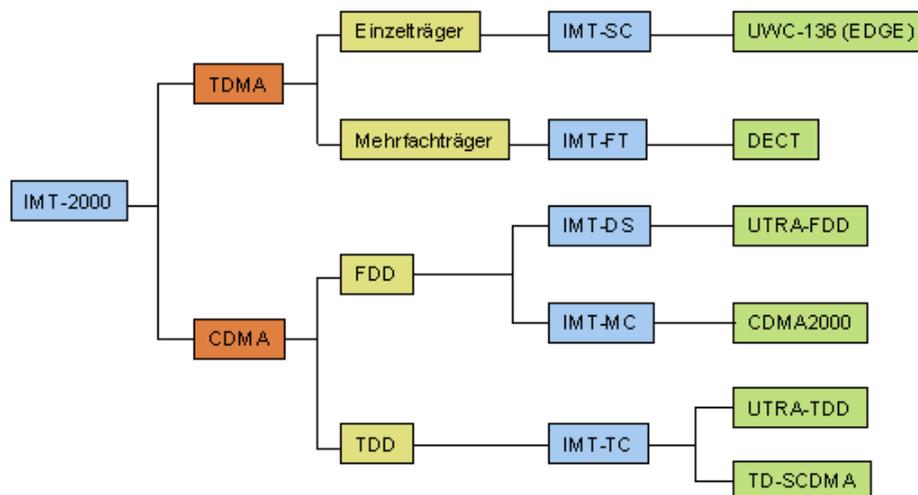


Abb. 2–5.: IMT-2000 Mobilfunksysteme (UMTSlink, 2009a)

Zu den **(W)-CDMA**-Systemen (*Wideband Code Division Multiple Access*) zählen die FDD-Komponente des UMTS-Standards in Europa (UTRA-FDD), die japanischen UMTS-Netze sowie das amerikanische CDMA-2000 als Weiterentwicklung von IS-95 (CDMA-One). Die Gruppe der **TD-CDMA**-Systeme beinhaltet UTRA-TDD (UMTS in Europa) sowie das chinesische TD-SCDMA (*Time Division – Synchronized Code Division Multiple Access*), das mit der UMTS-Release 4 ebenfalls in den UMTS-TDD-Modus integriert wurde.

Zu den **TDMA**-Systemen zählen UWC-136 als Weiterentwicklung von IS-136 (Digital PCS) in Amerika und das EDGE-Verfahren für GSM in Europa. Die **FD-TDMA**-Kategorie beherbergt eine Weiterentwicklung des europäischen Schnurlos-Telefoniestandards für Anwendungen mit niedriger

Mobilität (DECT+). Auch wenn UMTS also kein globaler Standard wurde, so konnte sich der in UMTS enthaltene Teilstandard UTRA-FDD bzw. W-CDMA weltweit zur meistverbreiteten 3G-Mobilfunktechnik entwickeln (*UMTSlink, 2009d*).

Um die Entwicklung und den Aufbau einer komplett neuen Mobilfunkgeneration zu rechtfertigen, wurde vor allem von den Betreibern eine Reihe von **Anforderungen** gestellt. Diese lassen sich in vier Hauptbereiche zusammenfassen. Eine *effektivere Nutzung* der zur Verfügung stehenden Frequenzressourcen (um die ständig wachsenden Kundenzahlen besser bedienen zu können), wesentlich *höhere Datenübertragungsraten* (um z.B. Videotelefonie oder einen Internetanschluss für mobile Dienste anbieten zu können), *mehr Sicherheit* durch bessere Verfahren bei der Authentifizierung und Verschlüsselung und ein (ev. sogar weltweit) *einheitlicher Standard*, der jedoch auch nach jahrelangen Diskussionen nicht erreicht werden konnte.

Für das Anbieten von **mobilen ortsabhängigen Diensten** (LBS) sind davon besonders folgende Punkte bedeutsam:

- Ein neues *zellulares* und *zonales Konzept* bei der Funkschnittstelle.
- Höhere und flexibel anpassbare *Übertragungsraten* (durch die größere Frequenzbandbreite und höhere spektrale Effizienz, d.h. Datendurchsatz pro Herz der Bandbreite).
- Kürzere *Signallauf-* und *Latenzzeiten* (entscheidend bei Ortsbestimmungsmethoden im Mobilfunknetz, da wesentlich mehr Einzelmessungen im selben Zeitintervall durchgeführt werden können).
- *Quality of Service* (QoS), mit dynamischer Anpassung an den jeweiligen Dienst sowie an die aktuelle Bitrate.

Die **Standardisierung von UMTS** erfolgte auf europäischer Ebene durch das **ETSI** (*European Telecommunications Standards Institute*). Parallel dazu entwickelten andere internationale Standardisierungsgremien, vor allem die japanische **ARIB** (*Association of Radio Industries and Business*), vergleichbare Techniken. Um die gesamten Standardisierungsbemühungen für UMTS international zu harmonisieren, wurden alle Aktivitäten im **3GPP** (*3rd Generation Partnership Project*) gebündelt, während z.B. die Aufgaben für CDMA-2000 vom 3GPP2 übernommen wurden (*Walke et al., 2002; Wikipedia, 2014b*).

Direkte Mitglieder von 3GPP(2) sind die Standardisierungsorganisationen der Regionen Europa, Japan, China, USA und Korea. Das 3GPP führt zusätzlich die Betreuung der GSM-, GPRS- und EDGE-Standards weiter. Diese weltweite Bündelung der Standardisierung von UMTS sowie dessen laufende Weiterentwicklung, sind von wesentlicher Bedeutung für die Implementierung von einheitlichen Ortsbestimmungstechnologien in zellularen Mobilfunknetzen.

Ähnlich wie bei GSM erfolgte die Standardisierung von UMTS in mehreren Stufen. Die erste davon stellte die Grundlage für den Start von UMTS in Japan und Europa dar und wird **Release 99**, bezogen auf das Jahr 1999, oder kurz R99, bezeichnet. Diese Ausgangsimplementierung enthält ein *Kernnetz*, das in weiten Teilen dem von GSM Phase 2+ entspricht, um eine möglichst wirtschaftliche Migration bei Betreibern von GSM-Netzen zu gestatten. An dieses Kernnetz ist das komplett neue *Funkzugangnetz* angeschlossen, mit dem höhere Datenraten und bessere Mechanismen zur Dienst-

gütesteuerung zur Verfügung stehen. Mit R99 waren über *UTRA-FDD* bereits Raten bis zu theoretisch 384 kBit/s möglich (Abb. 2–6.).

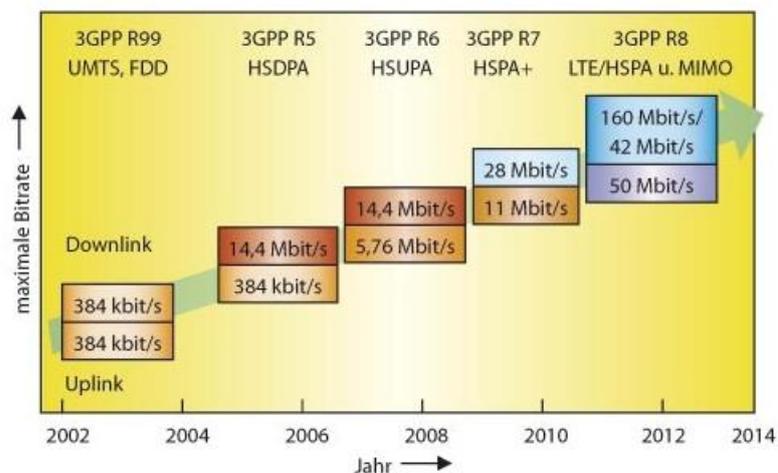


Abb. 2–6.: Datenraten bei UMTS und dessen Erweiterungen (Brückmann, 2008)

Ab der Nachfolgeversion **R2000** von UMTS ändert sich das Bezeichnungsschema und wegen Rückschritten im Zeitplan wurde sie in zwei Teile, **R4** und **R5**, getrennt. Manche Quellen benennen darum rückwirkend R99 auch als R3. Die Versionen davor bezeichnen, um eine durchlaufende Nummerierung zu gewährleisten, die Standards von GSM. Die Versionen R4/5 brachten u.a. Verbesserungen bei der *Dienstgütesteuerung* (QoS) und den *Sprachcodecs*, die Einführung eines neuen *Kernnetzkonzeptes* auf IP-Basis, die Möglichkeit von *VoIP* und die *Standardisierung von Location Services* (Brückmann, 2008).

2.1.2.4. Erweiterungen und Nachfolger von UMTS

Der wesentlichste Schritt in der **3GPP-Release 5** war die Einführung von **HSDPA** (*High Speed Downlink Packet Access*), womit Datenraten von maximal $7,2\text{ MBit/s}$ in Richtung Mobilteil ermöglicht und die Latenzzeiten von ca. 250 ms bei UMTS (bzw. $> 600\text{ ms}$ bei GPRS) auf ca. 150 ms gesenkt werden können (Abb. 2–12.). In der Standardspezifikation von UMTS (R99/R3) sind ursprünglich für bewegte Endgeräte nur Datenraten von maximal 384 kBit/s im Download und 64 im Upload vorgesehen. Der angegebene Maximalwert von 2 MBit/s für ruhende Teilnehmer gilt nur für den UMTS-Teil UTRA-TDD (Kap. 2.1.3.2.), welcher lokal in entsprechenden Kleinstzellen eingesetzt werden kann, wenn ein Mobilfunkanbieter dafür auch ein ungepaartes Frequenzpaket erworben hat. Die Mobilkom Austria startete in Österreich HSDPA (Tab. 2–1.) mit $1,8\text{ MBit/s}$ im Jänner 2006, erhöhte im Juni auf $3,6$ und 2007 auf $7,2$ (Mobilkom, 2009; Opitz, 2009).

Die nächste Verbesserung erfolgte mit **R6** durch die Implementierung von **HSUPA** (*High Speed Uplink Paket Access*), mit dem Paketdatenraten bis zu $5,7\text{ MBit/s}$ vom Mobilteil in Richtung Basisstation erreicht und die Latenzzeiten abermals verbessert werden können. Weiters wurde mit R6 die Spezifikation für HSDPA auf $14,4\text{ MBit/s}$ im Downstream angehoben. Besonders vorteilhaft ist die

Kombination von HSDPA und HSUPA. Dies wird mit **HSPA** benannt und bisweilen auch als „3,5 G-Netz“ eingeordnet (Sauter, 2008; 2011). In Österreich startete die Mobilkom HSUPA im Jahre 2007 mit 1,4 MBit/s und erhöhte bis April 2009 auf 5,7 (Tab. 2–1., (Mobilkom, 2009)).

In **R7** erfolgte dann eine letzte Erweiterung für HSPA mit Werten von 21,1 MBit/s für HSDPA und 11,5 für HSUPA, wobei diese Stufen später bereits zu „HSPA+“ gezählt wurden (Sauter, 2013; Schnabel, 2014k). Bei beiden Techniken ist jedoch zu beachten, dass, anders als beim Standard-UMTS, welches beim Datentransfer nur wenig Overhead besitzt, die als Maximum spezifizierten Datenraten wegen der höheren Redundanz um mindestens 20 Prozent zu reduzieren sind, um auf eine tatsächlich erzielbare Netto-Rate zu kommen (Opitz, 2009).

Welche Geschwindigkeit in der Praxis jedoch wirklich verfügbar ist, hängt noch von weiteren Faktoren ab und liegt mitunter nur bei der Hälfte der Maximalwerte:

- den technischen Möglichkeiten des jeweiligen Endgerätes (welche Erweiterungen von UMTS unterstützt werden)
- der Zellenauslastung
- der Entfernung zwischen Mobil- und Basisstation sowie den geographischen Gegebenheiten dazwischen (Stadtgebiet, Land etc.)
- der Bewegungsgeschwindigkeit des Mobilteilnehmers

Der nächste Schritt in der Entwicklung der 3 G-Datennetze erfolgte mit **HSPA+**, auch bezeichnet mit *HSPA Evolution*, *Evolved HSPA* oder **I-HSPA** (*Internet High Speed Paket Access*), und auf dem Weg zur 4. Generation zuweilen betitelt mit „3,75 G“ (Tab. 2–1.). In der **3GPP-Release 7** erstmals spezifiziert, führt diese Technik neben einem höherwertigeren Modulationsverfahren (*Higher Order Modulation*, **HOM**) die Mehr-Antennen-Übertragung **MIMO** (*Multiple Input Multiple Output*), wie sie schon von Netzen nach 802.11 n (WLAN) bekannt ist, im UMTS-Funkteil ein, nutzt aber dieselben Frequenzen und Bandbreiten wie bisher (Opitz, 2009; Schnabel, 2014l). Hiermit werden Raten von 28 MBit/s in Empfangs- und 11,5 in Senderichtung angegeben (Abb. 2–6.).

Eine weitere wesentliche Funktion von HSPA+, die *Continuous Packet Connectivity* (**CPC**), erlaubt dem mobilen Endgerät, Sender und Empfänger in Übertragungspausen abzuschalten, ohne eine Internetverbindung daraufhin neu aufbauen zu müssen. Dies verringert störende Interferenzen, verlängert die Akkulaufzeiten und bietet große Vorteile bei bestimmten *LBS*, wie z.B. Fußgängernavigation. Basisstationen ausgerüstet mit HSPA+ bekommen weiters eine schnellere Verbindung zum Kernnetz, was die Latenzzeiten nochmals auf ca. 80 ms verringert (Abb. 2–12.). Im weiteren Ausbau können die Empfangsraten von HSPA+ laufend erhöht werden. In der **R8** ist dies bereits spezifiziert auf 42,2 MBit/s und in der **R9** auf 56, 84 sowie 168 in den **R10** ff. sind in Entwicklung bzw. Implementierung, z.B. mittels der Technik **DC/MC-HSPA+** (*Dual/Multi Carrier*, wobei zwei und mehr Trägerfrequenzen kombiniert werden), (TecChannel, 2009b; Schnabel, 2014l).

Mit diesen Erweiterungen von UMTS steht **mobilen Diensten** jedenfalls eine Internetverbindung zur Verfügung, die geschwindigkeitsmäßig dem Festnetz-Standard *ADSL 2+* entspricht (Abb. 2–7.). Nachdem z.B. Deutschland die „Definition“ von Breitband 2009 von 384 kBit/s Übertragungsrate (was theoretisch der von UMTS entspricht) auf 1 MBit/s angehoben hat (Briegleb, 2009), kann man spätestens ab HSPA+ von einem *mobilen Breitbandanschluss* über das Mobilfunknetz sprechen. Damit gehört auch die vielfach sehr emotional geführte Diskussion, mobile Dienste (wie z.B. *LBS*) kön-

nen mangels einer guten Breitband-Verbindung nicht sinnvoll eingesetzt werden, der Vergangenheit an.

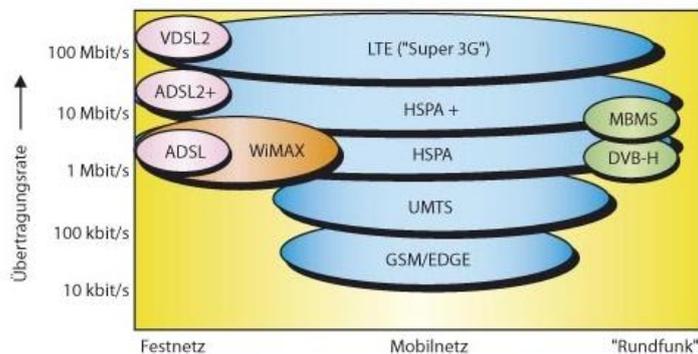


Abb. 2-7.: Geschwindigkeitsvergleich der Datenübertragung in Fest- und Mobilnetzen (Redl, 2007)

Die Mobilkom Austria (Mobilkom, 2009) startete HSPA+ in Österreich mit bis zu 21 MBit/s im Download ab März 2009 (Tab. 2-1.) und erhöhte durch die Nutzung von MIMO auf 28,8. Es ist jedoch, europaweit betrachtet, nicht ganz klar, wie weit HSPA+ überhaupt konsequent implementiert und erweitert oder gleich auf die nächste Technologie im Mobilfunk (LTE, Abb. 2-10.) übergegangen werden soll. Beides hat entsprechende Vor- aber auch Nachteile, sowohl für das Mobilfunknetz als auch die mobilen Endgeräte (TecChannel, 2009a).

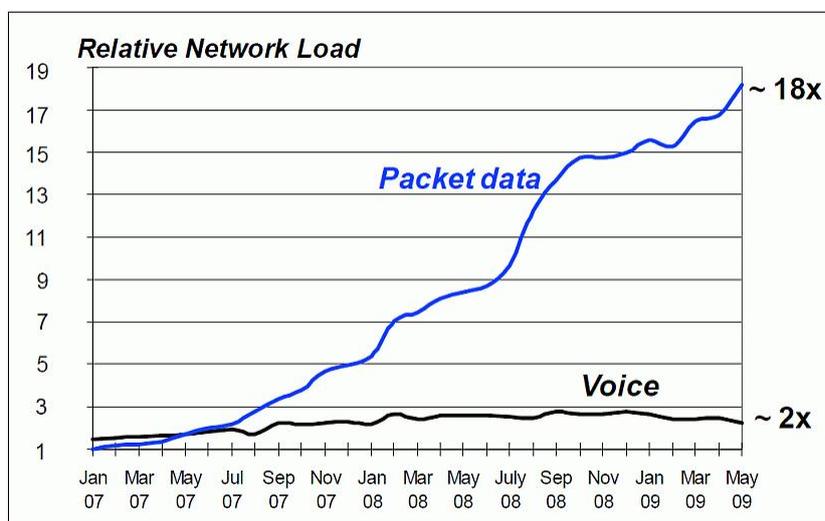


Abb. 2-8.: Steigerung der Übertragungen in UMTS- und HSPA-Netzen (Rysavy-Research, 2009)

Der stetig steigende Mehrbedarf an Kapazitäten und Geschwindigkeiten sowie sinkenden Reaktionszeiten führt zu einer massiven Weiterentwicklung der Mobilfunksysteme, insbesondere der Funkschnittstellen, in immer kürzeren Zeiträumen. Abb. 2-8., die von Zahlen mehrerer großer Mobilfunkanbieter weltweit stammt, zeigt den rapiden Anstieg der Daten- gegenüber der Gesprächsübertragung in UMTS- und HSPA-Netzen, wobei bereits im Mai 2007 Erstere Zweitere überholte. Mobiler Breit-

bandzugang wird heute nicht nur für das klassische Notebook, sondern zunehmend auch für Geräteklassen wie Netbooks, Smartphones und Tablets massiv nachgefragt. Diese neuen Endgeräte eignen sich auf Grund von Displaygröße, Gewicht und Akkulaufzeiten sehr gut für *mobile Dienste* und wegen dem meist schon integrierten GNSS-Empfangs- und Kommunikationsteil zur **Ortsbestimmung**, insbesondere für **Location Based Services**, die mit Karten und Luftbildern operieren. Eine Applikation für topographische Karten zur Orientierung und Navigation im Gelände, installiert auf dem Smartphone Nokia 5800¹⁵, zeigt z.B. *Abb. 2–9.*

Dienste dieser Art erfreuen sich zunehmenden Interesses, u.a. auch für die *persönliche Navigation von Fußgängern* über Mobilfunkgeräte, wofür bereits spezielles Kartenmaterial entwickelt wird. Darüber hinaus werden viele weitere Netz-Dienste, bei denen der Nutzer aktiv Inhalte auf Plattformen erzeugt, was gerne unter dem Überbegriff **Web 2.0** angeführt wird, auf mobilen Endgeräten verwendet. Dabei dürfen die Reaktionszeiten der Anwendungen bestimmte Werte nicht überschreiten, um ein ergonomisches Arbeiten zu gewährleisten. Viele Aspekte dieses *mobilen Web 2.0* und deren gegenseitige Beeinflussung werden z.B. in (*Sauter, 2009*) sehr ausführlich diskutiert.



Abb. 2–9.: Smartphone mit A-GPS und Karte (ViewRanger, 2014)

Long Term Evolution folgt den UMTS-Technologien

Die Übertragung größerer Datenmengen und das interaktive Arbeiten mit **mobilen Applikationen**, die laufend auf Server im Internet oder in einem Firmennetzwerk zugreifen, verlangen nach Mobilfunknetzen, die Daten schnell übertragen, kurze Reaktionszeiten haben und mit der beschränkten Ressource Frequenz sehr effizient umgehen können. Aus diesen Gründen hat die **ITU-R** (*ITU-R, 2014b*), nach umfangreichen Vorarbeiten der *Allianz Next Generation Mobile Network (NGMN, (NGMN, 2014))*, gewisse Anforderungen aufgestellt, welche Leistungsmerkmale ein zellulares Netz der **4. Generation** (4G) mindestens erfüllen muss (z.B. publiziert im Report ITU-R M.2134, (*ITU-R, 2014a*)).

Dies geschah in der Art und Weise ähnlich jenen Vorschlägen, wie sie bereits für die Technologien der 3. Generation (UMTS, CDMA-2000, HSPA etc.) gemacht wurden (*Kap. 2.1.2.3.*). Sprach man damals von einem *Technologie-Pool IMT-2000 für 3G-Standards*, so werden heute unter dem Begriff **IMT-Advanced** jene Mobilfunktechnologien zusammengefasst, die den ITU-Vorgaben für 4G entsprechen.

In der Entwicklungslinie von GSM über UMTS und HSPA(+) sammelt das 3GPP in ständigem Kontakt mit den entsprechenden Technologieprovidern Spezifikationen für die nächsten Meilensteine im

¹⁵ Das Nokia 5800 ist bereits ausgerüstet mit Touchscreen, HSDPA und A-GPS (*Kap. 3.3.6.*) und kam im Jänner 2009 auf den Markt (*Wikipedia, 2014o*).

Mobilfunk, die unter dem Sammelbegriff **LTE** (*Long Term Evolution*) geführt werden (Abb. 2–10.). Dabei sind eine Vielzahl an Versionen zu erwarten, die Schritt für Schritt am Mobilfunkmarkt umgesetzt werden. Die erste Ausprägung davon wurde, nach langen Vorarbeiten seit 2004, Ende 2007 als **Release 8** begonnen (Brückmann, 2008). Im Dezember 2008 wurde sie dann, bereits mit einigen Zusätzen, eingefroren und Anfang 2009 endgültig verabschiedet.

Diese R8 ist bereits in diversen Netzen mit neueren Empfangsgeräten erprobt und von vielerlei Seiten beschrieben und getestet worden (u.v. (Robson, 2009; Sokolov, 2009; Zivadinovic, 2009)). Sie entspricht jedoch noch nicht den Vorgaben der ITU zu Netzen der 4. Generation, weshalb der Start von LTE mit R8 nicht als „4G“ zu bezeichnen ist. Dies wird jedoch in vielerlei Publikationen, vor allem im Marketing, fälschlicherweise so dargeboten (Tab. 2–1.). In Österreich startete die Mobilkom Austria, bereits unter der neuen Firmenbezeichnung „A1 Telekom Austria“, den kommerziellen LTE-Betrieb am 19. Oktober 2010 in Wien (LTE-Anbieter.info, 2010; Wikipedia, 2014m). Die Verfügbarkeit an entsprechenden Endgeräten, in erster Linie LTE-Sticks, war jedoch noch sehr gering.



Abb. 2–10.: LTE-Logo
(3GPP, 2014a)

Wurde mit der *Einführung von UMTS* ursprünglich klar der Beginn der „3. Generation“ festgelegt¹⁶, so spricht man heute bei den UMTS-Nachfolgern gerne von Systemen „**Beyond 3 G**“ (B3G) und wird für die ersten ITU-konformen 4G-Netze mitunter noch eigene Bezeichnungen finden. LTE in der Startphase (**R8** und **R9**) wird auch als **Super 3 G**, **HSOPA** (*High Speed OFDM Packet Access*, bezogen auf das Zugriffsverfahren) oder „3,9G“ benannt. Für spätere Ausprägungen (R10 ff.) hat sich bisher der Überbegriff **LTE-Advanced** (mit Anlehnung an die Bezeichnung *IMT-Advanced*) etabliert, bisweilen wird auch von LTE+ gesprochen (Sauter, 2009).

Abb. 2–11. zeigt einen Überblick zur Entwicklung wichtiger *Mobilfunktechnologien*, von denen abzusehen ist, dass sie das Potential haben, in 4G-Netzen eine wesentliche Rolle zu spielen. Die Zeitangaben beziehen sich auf die erwartete kommerzielle Implementierung, mit Ausnahme von 2008, wo alle in diesem Jahr verfügbaren Technologien angeführt sind. Die beschriebenen Übertragungsraten im Down- (DL) und Uplink (UL) entsprechen den spezifizierten theoretischen Maximalraten, welche in der Praxis jedoch nicht erreicht werden. **LTE** kann bei der Einführung (nur Datendienste) bis zu *100 MBit/s* in Richtung Mobilgerät und ca. die Hälfte zur Basisstation übertragen (je nach Kategorie des mobilen Gerätes) und dies bei Latenzzeiten von ca. *20 ms*. Diese Werte setzen dabei jeweils eine Kanalbandbreite von *20 MHz* und *2 x 2 MIMO* (je zwei Antennen an der Basisstation und beim mobilen Gerät) voraus (Brückmann, 2008).

In Abb. 2–12. sind die *Latenzzeiten* unterschiedlicher Mobilfunktechniken zu sehen, die durch das 3GPP spezifiziert wurden. Die gezeigten Werte stammen aus Netzen mit kommerzieller Ausrüstung. Als **Latenz** sind hierbei jene Zeiten zu verstehen, die in der Praxis als *Round-Trip-Time* (RTT) gut messbar sind und sich auf jenes Zeitintervall beziehen, die ein Endgerät benötigt, um ein kleines Datenpaket an einen externen Server (im Internet) zu schicken und hierauf eine Antwort zu erhalten (dieser Server bzw. Netzwerkknoten wird „angepingt“). Andere Latenzzeiten geben z.B. nur die Ver-

¹⁶ Nach strenger ITU-Auslegung traf auch dies, im Nachhinein betrachtet, nicht zu, denn erst mit HSPA konnten wirklich alle Bedingungen auch in der Praxis erfüllt werden (Tab. 2–2.).

zögerung der Luftschnittstelle selbst an, die bei LTE ca. 10 ms (RTT) beträgt, bzw. die Hälfte, wenn man nur eine Richtung betrachtet (Robson, 2009).

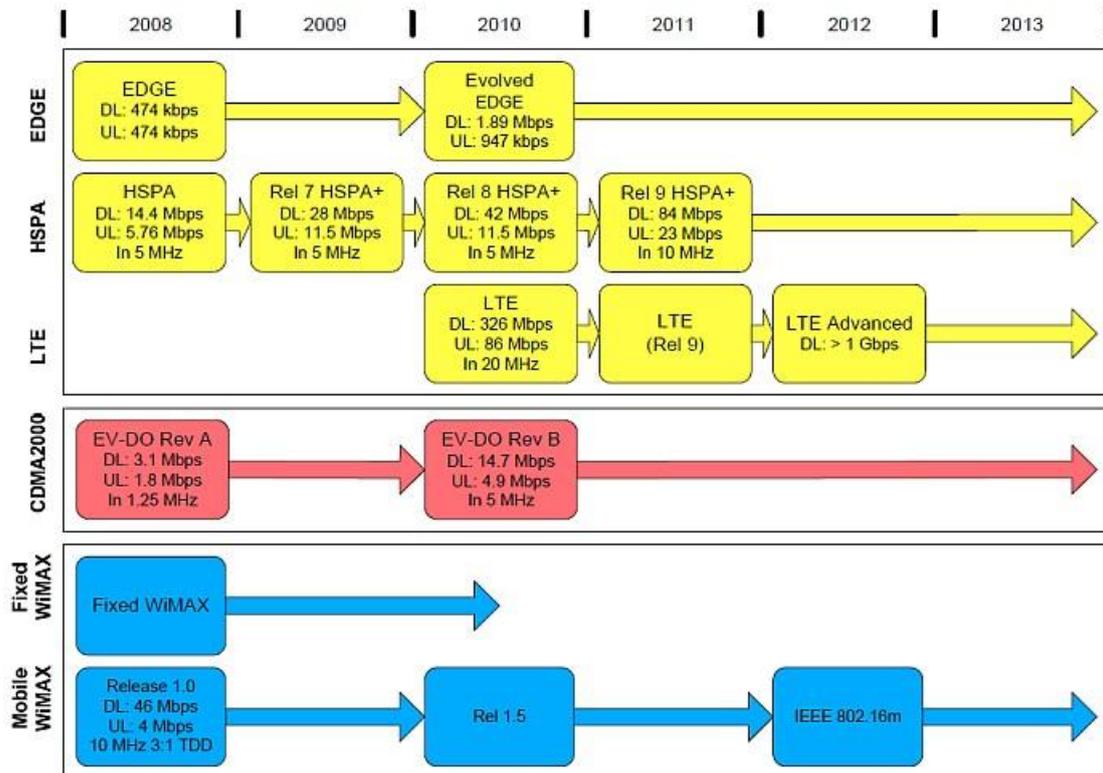


Abb. 2-11.: Entwicklung von Mobilfunktechnologien mit Übertragungsraten (Rysavy-Research, 2009)

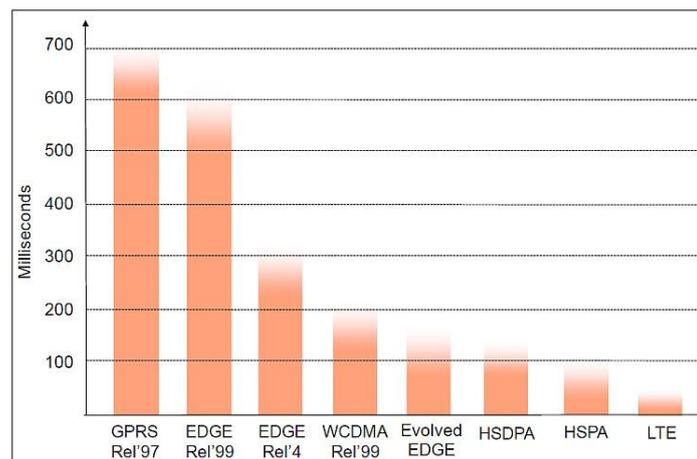


Abb. 2-12.: Latenzzeiten unterschiedlicher Mobilfunktechniken des 3GPP (Rysavy-Research, 2009)

Das *Potential* von *LTE* ist jedoch weitaus umfangreicher als die ursprüngliche Spezifikation der 3GPP (R8) vermuten lässt, nach der Mobilfunkanbieter ihre einführenden kommerziellen Produkte gestalten. Der Entwicklungsschritt von UMTS zu *LTE* ist wesentlich größer als der von GSM zu

UMTS und der folgende Technologiepfad in Richtung LTE-Advanced ist sehr stark ausgeprägt. Interessante Indizien hierfür sind u.a., dass selbst sehr große Betreiber von Mobilfunknetzen, die bis jetzt in erster Linie CDMA-Technik eingesetzt haben, wie z.B. *Verizon Wireless* (Berg, 2009) oder *China Telecom* (Au, 2008), komplett auf LTE migrieren. Bei anderen Anbietern hat sich LTE gegenüber WiMAX durchgesetzt oder wird direkt als Nachfolger von 2 G-Netzen eingesetzt (als Beispiel *AlMadar Aljadeed*, der größte Betreiber in Libyen (Wikipedia, 2014a)).

Generation	Voraussetzungen	Mobilfunktechnologien
2 G	keine	GSM , CDMA-2000 1xRTT
3 G	IMT-2000 : 144 kBit/s DL in Fahrt, 384 für Fußgänger, 2 MBit/s in Gebäuden	CDMA-2000 EV-DO, UMTS-HSPA , WiMAX
4 G	IMT-Advanced : skalierbare Kanalbandbreiten bis inkl. 40 MHz (Empfehlung zur Unterstützung bis zu 100 MHz), maximale spektrale Effizienz im DL von 15 Bit/s/Hz (bei 4x4 MIMO) u. im UL von 6,75 (bei 2x4 MIMO)	LTE-Advanced und IEEE 802.16m (WiMAX 2 mit erweiterter Luftschnittstelle) sind in laufender Spezifikation

Tab. 2–2.: Generationen im zellularen Mobilfunk und ihre Voraussetzungen lt. ITU (Rysavy-Research, 2009)

Tab. 2–2. zeigt die Einteilung der Mobilfunkgenerationen nach Vorgaben der ITU-R, wobei hier nur die wichtigsten angeführt sind, und entsprechende Technologien, die diese erfüllen. Auffallend ist, dass die Leistungsfähigkeit von **IMT-Advanced** (4 G) nicht mehr über Datenraten beschrieben wird, sondern mittels Kanalbandbreiten und der spektralen Effizienz. In Tab. 2–3. sind die Forderungen für die durchschnittliche spektrale Effizienz und die minimale Kapazität von VoIP (später auch mit VoLTE bezeichnet) für eine Zelle angegeben.

Umgebung	Downlink [Bit/s/Hz]	Uplink [Bit/s/Hz]	VoIP [aktive Nutzer/Zelle/MHz]
Gebäudeinneres	3,0	2,3	50
Mikrozelle	2,6	1,8	40
städtische Basisabdeckung	2,2	1,4	40
bei hohen Geschwindigkeiten	1,1	0,7	30

Tab. 2–3.: Vorgaben der ITU zu IMT-Advanced auf Zellebene (Rysavy-Research, 2009)

Die vom 3GPP bereits seit März 2008 gesammelten und analysierten Techniken für eine Weiterentwicklung des Mobilfunkstandards LTE (nach R8 & R9) firmieren heute i.A. unter dem Namen **LTE-Advanced** (LTE-A) und erfahren mit der **Release 10** ihre erste Standardisierung (Abb. 2–13.). Sie werden als hoffnungsvollste globale Mobilfunktechnologie angesehen, die die Voraussetzungen der ITU für ein „richtiges“ 4 G-Netz erfüllen und noch weit darüber hinaus gehen werden.

Diese R10 des 3GPP, die eine Rückwärts- wie auch Vorwärtskompatibilität zu LTE garantiert, sich also ähnlich verhält, wie heute HSPA zu W-CDMA (UMTS), soll u.a. folgende wichtige Möglich-

keiten beinhalten, die auch maßgeblich sind für die **Ortsbestimmung** in diesen Netzen (*Rysavy-Research, 2009; Sauter, 2013*):

- Unterstützung höherer Kanalbandbreiten bis zu *100 MHz* durch *Aggregation* von einzelnen Trägern zu *20 MHz* (*Carrier Aggregation*).
- Weiterentwicklung der *Mehrantennentechnik MIMO im Downlink* bis zu *8 x 8*.
- *MIMO* auch *im Uplink* bis zu *4 x 4*.
- *CoMP (Coordinated Multipoint Reception and Transmission)* insbesondere für höhere Übertragungsraten im Uplink und an Funkzellenrändern.

Alle angeführten Techniken bemühen sich vor allem darum, die *Kapazität* einer gesamten Verbindung zu *erhöhen*, da die Datenmenge, die über einen einzelnen Übertragungskanal gegebener Breite befördert werden kann, begrenzt ist (*Shannon's Law*). Eine solche Beschränkung ist gegeben auf Grund des vorhandenen Rauschens, das zwar mit bestimmten Maßnahmen reduziert, aber nie völlig vermieden werden kann (u.a. (*Sauter, 2013*)).



Abb. 2–13.: LTE-A-Logo
(3GPP, 2014b)

CoMP lässt sich sowohl in 3 G- als auch 4G-Netzen einsetzen und hat große Auswirkungen auf **Ortsbestimmungsmethoden** in Mobilfunknetzen. Da hierbei das mobile Endgerät mit Antennen mehrerer unterschiedlicher Basisstationen assoziiert wird und daher ad hoc keine eindeutige COO (*Cell of Origin*, „Heimatzelle“, bei der man in GSM/UMTS-Netzen eindeutig eingebucht ist) vorliegt (*Kap. 3.3.2.*), müssen zusätzlich Technologien eingesetzt werden.

Problematisch ist dies z.B. bei der **Standortbestimmung in Notrufszzenarien** (E-112), da die EU hier indirekt die Methode COO als Mindestmaß vorgibt, was z.B. von Deutschland auch schon in nationales Recht übernommen wurde (*BMWT, 2009, Kap. 3.1.3.*). Es kann jedoch jener Antennenstandort, welcher zum Mobilgerät geographisch am nächsten gelegen ist, unter allen, die bei einer CoMP-Verbindung in das Mobilfunknetz beteiligt sind, ohne weitere Kenntnisse, wie z.B. aus *Signalstärkemessungen* abgeleitete Distanzinformationen, nicht gefunden werden.

Mit CoMP wird insbesondere das **MIMO**-Verfahren genutzt, bei dem das Senden und Empfangen von Signalen zwischen Mobilgerät und mehreren Zugangspunkten koordiniert ist. Im Gegensatz zum klassischen MIMO, wo sich die eingesetzten Antennen an einem einzigen Standort befinden (*Antennenfelder*), verbindet CoMP dagegen Antennen, die an verschiedenen, verteilten Orten errichtet sind. Feldtests zu dieser Technologie wurden z.B. von den Bell Labs¹⁷ zusammen mit den T-Labs¹⁸ erfolgreich in der Berliner Innenstadt durchgeführt (*Sawall, 2009*). Dabei fand das *2,6-GHz*-Frequenzband Verwendung, welches in Europa für LTE vorwiegend in Städten eingesetzt wird (neben Frequenzbereichen aus der „*digitalen Dividende*“ um *0,8 GHz* und einem „*Refarming*“ von GSM-900/1800 für die flächendeckende Grundversorgung mittels Makrozellen).

¹⁷ Eine Forschungssparte der Alcatel-Lucent Gruppe.

¹⁸ Zur Deutschen Telekom gehörig.

Eine weitere interessante Entwicklung, die für Mobilfunknetze nach LTE-Advanced diskutiert wird, sind **Relays**. Die hohen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von LTE-A-Netzen verlangen nach einer *sukzessiven Verdichtung* der Infrastruktur im Funknetzteil und hierbei vor allem die Reduzierung einzelner Distanzen zwischen Sender und Empfänger. Neben CoMP sollen Relays dazu beitragen, indem sie (im einfachsten Fall als *Repeater*) die Signale abstrahlender Zellen (*Donor Cells*) empfangen, verstärken und zu den mobilen Geräten weiterleiten. Dabei kann eine Sendezelle mehrere Relays bedienen, aber auch zusätzlich mit Mobilgeräten direkt kommunizieren (*Parkvall und Astely, 2009*). Abb. 2–14. verdeutlicht in schematischer Darstellung das Prinzip eines Relays.

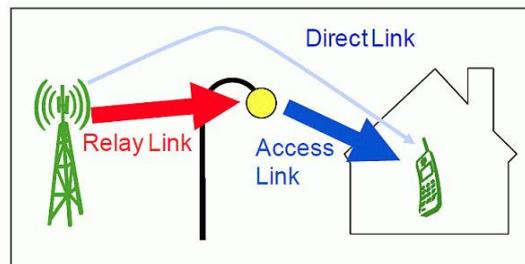


Abb. 2–14.: Relays in LTE-Advanced Mobilfunknetzen
(Rysavy-Research, 2009)

CoMP und Relays lassen sich weiters auch kombinieren, um zusätzlichen Nutzen für eine hohe Netzwerkkapazität zu generieren. Für **Ortsbestimmungsmethoden in Mobilfunknetzen**, die sich vor allem auf *Trilateration* oder *Triangulation* von Signalen stützen (*Kap. 3.3.4. und Kap. 3.3.5.*), wird diese zunehmende Komplexität der Netzwerkstruktur im Funkteil eine sehr große Überarbeitung und Erweiterung ihrer Techniken erfordern.

Es lässt sich heute bereits gut absehen, dass die Standards des 3GPP (**R10/11**) zu LTE-A die Anforderungen der ITU bezüglich IMT-Advanced bei weitem erfüllen können. Schon bei einer gesamten Bandbreite von *40 MHz*, z.B. mit einem Zusammenfassen von zwei Bändern zu je *20 MHz* (*Carrier Aggregation*), und Anwendung von 8×8 MIMO kann eine maximale Spektraleffizienz von *30 Bit/s/Hz* erreicht werden. Dies ermöglicht im Downlink Datenraten bis zu theoretischen *1 GBit/s* (*Rysavy-Research, 2009*). Durch fortfolgende Erhöhung der Gesamtbandbreite bis zu *100 MHz* (sofern Frequenzressourcen in diesem Umfang einzelnen Anbietern auch zur Verfügung stehen) lassen sich die Übertragungsraten noch weiter steigern.

Zusammen mit den Möglichkeiten zur schrittweisen Einführung, der guten Skalierbarkeit der gesamten Technologie, den Vereinfachungen im Kernnetz und den Automatismen im Netzmanagement haben LTE und LTE-Advanced im Wettbewerb um 4G und darüber hinaus gegenüber WiMAX und UMB (*Ultra Mobile Broadband*) bereits einen beträchtlichen Vorsprung. Im erweiterten europäischen Raum werden diese 3GPP-Techniken eine dominierende Rolle im zellularen Mobilfunk der nächsten 10 Jahre spielen und mit den **Releases 12 & 13** noch eine Reihe von Erweiterungen erfahren („**Beyond 4G**“, (*Sauter, 2013; 3GPP, 2014b*)).

In Österreich setzte der Mobilfunkanbieter A1 Ende November 2014 in Graz einen ersten Schritt in Richtung LTE-A durch eine Anhebung der Datenrate im DL auf maximal *300 Mbit/s* mittels Carrier Aggregation. Diese theoretischen Werte können, ein entsprechendes Endgerät vorausgesetzt, durch gleichzeitige Verwendung der Frequenzen um *800* und *2600 MHz* erreicht werden (je *20 MHz*

Bandbreite und 2x2 MIMO). Hierbei erhöht sich weiters die LTE-Abdeckung innerhalb von Gebäuden wesentlich (Gruber, 2014).

2.1.3. Die Netzarchitektur bei GSM, UMTS und LTE in ihrer Bedeutung für LBS

2.1.3.1. Übersicht und Teilsysteme von GSM

Ein **GSM-Netz** ist hierarchisch gegliedert und besteht, vom Großen ins Kleine betrachtet, aus mindestens einer Verwaltungsregion, die einer Mobilvermittlungsstelle (*Mobile Switching Centre*, **MSC**) untersteht (Abb. 2–15.). Jede dieser Verwaltungsregionen setzt sich wiederum aus mindestens einer Lokalisierungszone (*Location Area*, **LA**) zusammen, häufig auch als Aufenthaltsbereich bezeichnet. Eine LA wird gebildet aus mehreren Gruppen von **Zellen**. Jeweils eine Basisstationssteuerung (*Base Station Controller*, **BSC**) überwacht eine dieser Zellgruppen (Eberspächer et al., 2001). Je LA ist also mindestens eine BSC vorhanden, wobei die Zellen einer BSC auch verschiedenen LA zugeordnet sein können.

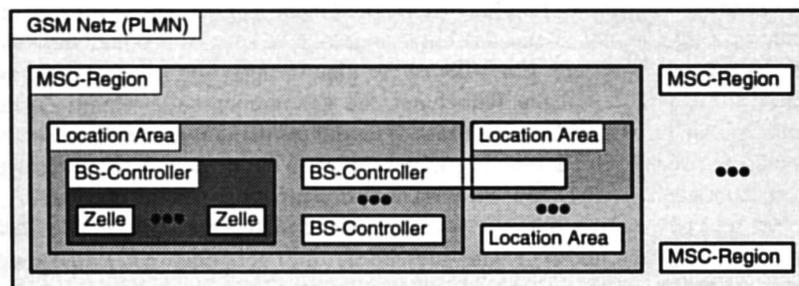


Abb. 2–15.: Systemhierarchie von GSM (Eberspächer und Vögel, 1997)

Die genaue Aufteilung eines GSM-Versorgungsgebietes in Zellen und ihre Organisation bzw. Verwaltung in LA und MSC ist jedoch nicht eindeutig festgelegt und dem jeweiligen Netzbetreiber überlassen, der somit eine Vielzahl an *Optimierungsmöglichkeiten* besitzt. Diese Optimierungen dienen jedoch ausschließlich den Belangen der Kommunikation (sowie später auch der Datenübertragung) und sind primär nicht auf **Ortsbestimmung** oder **Navigation** ausgerichtet (Kap. 3.3.).

Abb. 2–16. zeigt die *funktionale Architektur* eines GSM-Netzes mit seinen wesentlichen Komponenten. Eine **Zelle** wird aus dem Funkversorgungsbereich einer Basisstation (*Base Transceiving Station*, **BTS**) gebildet. Mehrere Basisstationen werden gemeinsam von einer BSC gesteuert und die Gespräche der Mobilstationen in ihren Zellen gebündelt von einer MSC vermittelt. Eine weitere dedizierte Vermittlungsstelle (*Gateway MSC*, **GMSC**) bearbeitet Gespräche in das und aus dem Festnetz. Betrieb und Wartung werden von einer zentralen Stelle aus organisiert (*Operation and Maintenance Centre*, **OMC**). Für Vermittlungszwecke und zum Management des Netzes stehen mehrere Datenbanken zur Verfügung (*Home Location Register*, **HLR**; *Visited oder Visitor Location Register*, **VLR**; *Authentication Center*, **AUC** und *Equipment Identity Register*, **EIR**), (Eberspächer et al., 2001)).

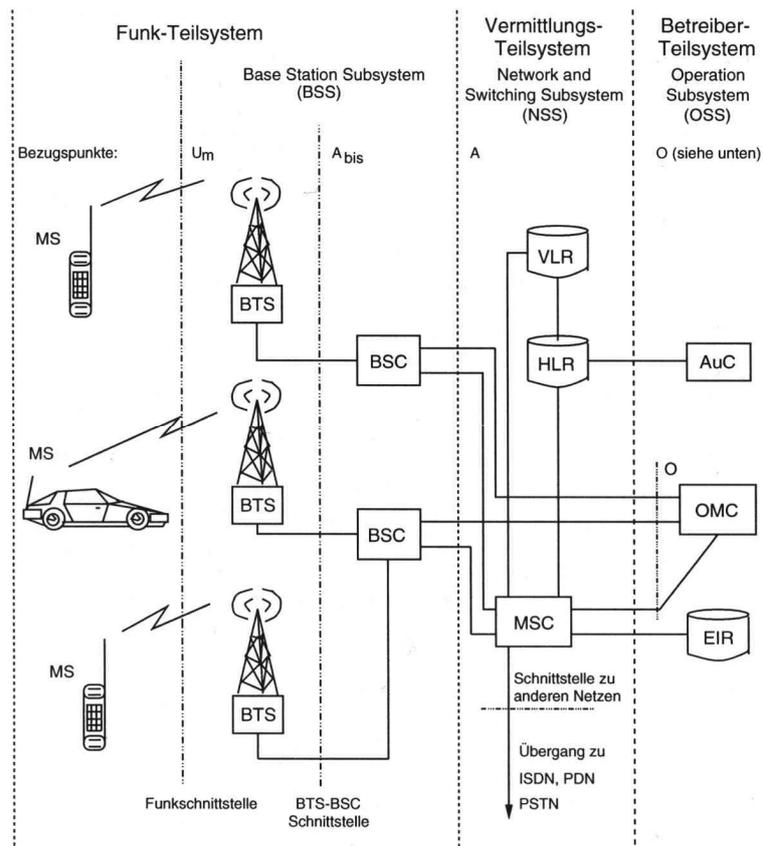


Abb. 2–16.: Funktionale Architektur eines GSM-Netzes (Walke, 2000)

Im **Home Location Register (HLR)** sind alle bei einem Netzbetreiber registrierten Teilnehmer mit permanenten (z.B. Dienstprofil) und auch temporären Daten (z.B. Verweis auf den **augenblicklichen Aufenthaltsort**) gespeichert. Bei einem Anruf für einen mobilen Teilnehmer wird also immer zuerst das HLR abgefragt, um seinen aktuellen Ort zu ermitteln. Ein **VLR** ist für eine Gruppe von Location Areas (LA) zuständig und speichert die Daten derjenigen Teilnehmer, die sich momentan in seinem Zuständigkeitsbereich aufhalten. Im **AuC** werden sicherheitsrelevante Daten (Schlüssel zur Authentifizierung und Nutzdatenverschlüsselung) generiert und abgelegt, während im **EIR** nicht die Teilnehmer, sondern deren Geräte registriert werden (Eberspächer et al., 2001).

Die Teilsysteme von GSM

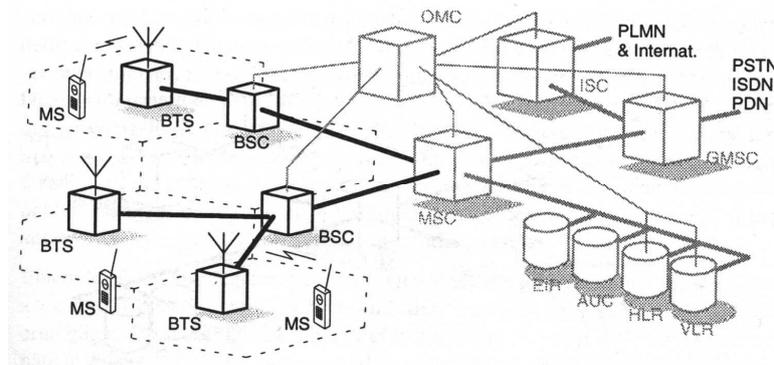
In seiner Spezifikation wird das GSM-System in folgende Teilsysteme gegliedert (Abb. 2–16., u.a. (Walke, 2000)):

- Funkteilsystem (*Radio Subsystem, RSS*)
- Vermittlungsteilsystem (*Network and Switching Subsystem, NSS*)
- Betreibersteilsystem (*Operation Subsystem, OSS*)

Funkteilssystem – RSS

Die Komponenten des GSM-Funkteilsystems zeigt *Abb. 2–17.* Es besteht aus den mobilen Endgeräten, auch Mobilstationen genannt (*Mobile Station, MS*), und dem Basisstationsteilsystem (*Base Station Subsystem, BSS*). Das BSS wiederum setzt sich aus den *Basisstationssteuerungen* (BSC) und einer oder mehrerer *Basisstationen* (BTS) je BSC zusammen (*Walke, 2000*).

Eine **GSM-Zelle** wird vom Funkbereich einer *Basisstation* (BTS) aufgespannt. Sie stellt in dieser Zelle die Funkkanäle zur Verfügung und steht somit auf der Netzseite der Funkschnittstelle eines GSM-Netzes. Die BTS besitzt dazu neben dem HF-Teil (Sende- und Empfangseinrichtung) nur einige wenige Komponenten zur Signal- und Protokollverarbeitung. Beispielsweise werden in der BTS die Fehlerschutzcodierung und -decodierung für den Funkkanal durchgeführt. Um die BTS klein zu halten, ist die wesentliche Steuerungs- und Protokollintelligenz in den BSC verlagert, der auch mehrere BTS verwalten kann (*Eberspächer et al., 2001*). Im BSC wird beispielsweise das **Handover-Protokoll** (*Kap. 2.1.4.3.*) abgewickelt.



*Abb. 2–17.: Komponenten des GSM-Funkteilsystems
(Eberspächer und Vögel, 1997)*

Eine **Mobilstation** (MS) besteht aus zwei wesentlichen Komponenten. Dem Gerät selbst (*Mobile Equipment*) und dem *Subscriber Identity Module* (**SIM**). Erst das SIM eines Teilnehmers macht aus einem Mobilgerät eine vollwertige MS, mit der ein Dienstzugang möglich ist bzw. die letztendlich angerufen oder **geortet** werden kann. Jedes Mobilgerät ist mit einer international eindeutigen Geräteerkennung (*International Mobile Equipment Identity, IMEI*), einer Art Seriennummer, ausgestattet, die von den Netzbetreibern im *Equipment Identity Register* (EIR) gespeichert wird. Zusätzlich besitzt jede MS abhängig vom aktuellen Benutzer dessen Teilnehmererkennung (*International Mobile Subscriber Identity, IMSI*) und Rufnummer, gespeichert in seinem SIM, wodurch die MS sozusagen personalisiert wird. D.h. eine Mobilstation kann nur betrieben werden, wenn ein SIM mit gültiger IMSI in einem Gerät mit gültiger IMEI vorhanden ist, da nur so z.B. die Gebührenabrechnung oder eine **Ortung im Netz** möglich ist.

Durch dieses bei GSM zum ersten Mal konsequent angewandte Konzept des SIM wird einerseits eine Trennung der Benutzer- von der Gerätemobilität erreicht, womit internationales Roaming unabhängig von Mobilgerät und Netztechnologie ermöglicht wird. Andererseits übernimmt das SIM noch wesentlich mehr Aufgaben. In ihm sind alle geheim zu haltenden kryptographischen Algorithmen realisiert, die auf Basis von Teilnehmererkennung und geheimen Schlüsseln wichtige Funktionen für

die Authentifizierung und Nutzdatenverschlüsselung implementieren (Eberspächer et al., 2001). Darüber hinaus können am SIM z.B. auch Kurznachrichten (SMS), Gebühreninformationen und Telefonbuchverzeichnisse gespeichert werden. Weiters lassen sich hier auch diverse Softwareapplikationen, u.a. solche, die für bestimmte **Ortsbestimmungsmethoden** notwendig sind, ablegen (Kap. 3.3.).

Vermittlungsteilsystem – NSS

Das Vermittlungsteilsystem (Abb. 2–18.) besteht aus den *Mobilvermittlungsstellen* (MSC) und den Datenbanken, welche die zur Vermittlung und Dienstbringung notwendigen Informationen speichern (HLR und VLR), (Eberspächer et al., 2001).

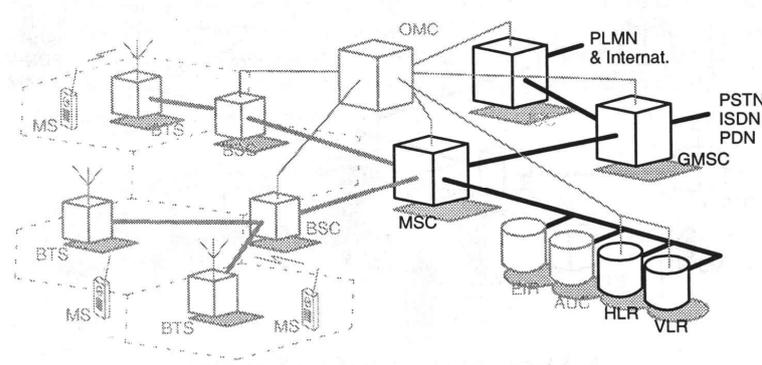


Abb. 2–18.: Komponenten des GSM-Vermittlungsteilsystems (Eberspächer und Vögel, 1997)

Die **MSC** bilden die Vermittlungsknoten in einem GSM-Netz. Sie erfüllen alle vermittlungstechnischen Funktionen eines Festnetzknotens, wie z.B. Wegesuche und Signalwegschaltung. Darüber hinaus hat eine MSC die Zuteilung und Verwaltung von Funkressourcen und die Mobilität der Teilnehmer zu berücksichtigen. Dafür sind Funktionen für die Aufenthaltsregistrierung von Teilnehmern und für den Handover von Verbindungen (Kap. 2.1.4.3.) vorgesehen.

Weiters stehen für die Verbindung von Gesprächen mit dem Festnetz eigene Vermittlungsstellen (*Gateway MSC*) zur Verfügung. Dazu fragt ein GMSC Wegesuchinformationen aus dem HLR ab und kann damit die Verbindung zu der MSC weiter routen, in dessen Gebiet sich die MS momentan aufhält. Verbindungen zu anderen Mobilnetzen (PLMN) und internationale Verbindungen werden meist über das **ISC** (*International Switching Center*) des jeweiligen Landes geroutet.

Zur Teilnehmerregistrierung und –lokalisierung stehen zwei funktionale Einheiten, das *Heimatregister* HLR und das *Besucherregister* VLR zur Verfügung. Im Allgemeinen ist je Mobilfunknetz ein zentrales HLR und je MSC ein VLR vorhanden. Diese Verteilung hängt u.a. ab von der Teilnehmeranzahl und der Organisation des Netzes.

Im **HLR** werden alle permanenten (z.B. Rufnummer), relevanten temporären Daten und alle administrativen Einstellungen eines Teilnehmers gespeichert. Dazu gehören neben festen Einträgen wie abonnierten Diensten und Berechtigungen vor allem auch ein Verweis auf den **aktuellen Aufenthaltsort** einer MS.

Das **VLR** speichert die Daten aller MS, die sich momentan im Verwaltungsbereich der zugehörigen MSC aufhalten, wobei ein VLR für das Gebiet eines oder mehrerer MSC verantwortlich sein kann. Da sich MS frei bewegen können, sind sie entweder in einem VLR ihres Heimatnetzes oder dem eines anderen Betreibers eingebucht, sofern zu diesem ein Roaming-Abkommen besteht. Eine MS startet dazu jeweils beim Betreten einer *Lokalisierungszone* (LA) eine Registrierungsprozedur. Die zuständige MSC leitet dabei die Identität der MS und ihren momentanen Aufenthaltsort an das VLR weiter, das diese Werte in seine Datenbank einträgt und damit die MS registriert. Wenn die MS noch nicht in diesem VLR registriert war, wird das HLR über den aktuellen Aufenthaltsort der MS informiert. Dabei werden Informationen an das HLR übergeben, welche die Wegesuche für Rufe zu dieser MS ermöglichen (*Eberspächer et al., 2001*).

Diese komplexe Funktionalität bildet auch die Grundlage all jener *Ortsbestimmungsmethoden*, die als Position eines Mobilgerätes (MS) primär den *Mittelpunkt der jeweiligen Heimatzone* bzw. den zugehörigen *BTS-Standort* angeben (Cell-ID, (*Kap. 3.3.2.*)).

Betreiberteilsystem – OSS

Der laufende Betrieb in einem GSM-Netz wird mit dem Betreiberteilsystem gesteuert und gewartet (*Abb. 2–19.*). Ein Teilnehmer bemerkt die Funktionalitäten nur indirekt, indem er ein (fast) ständig intaktes Mobilfunknetz zur Verfügung hat.

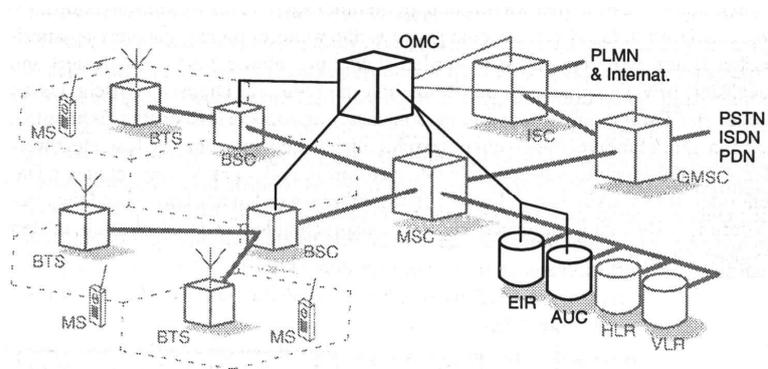


Abb. 2–19.: Komponenten des GSM-Betreiberteilsystems (Eberspächer und Vögel, 1997)

Die Funktionen des OSS sind drei Aufgabengebieten zugeordnet (u.a. (*Walke, 2000*)):

- Teilnehmerverwaltung
- Netzbetrieb und Wartung
- Mobilendgeräteverwaltung

Um diese Funktionen erfüllen zu können, gehören folgende Netzelemente zum OSS (*Eberspächer et al., 2001*). Das Betriebs- und Wartungszentrum (*Operation and Maintenance Centre, OMC*), das *Authentication Center AUC* und das *Gerätregister EIR*.

Zu den Aufgaben des **OMC** gehören:

- Verwaltung und kommerzieller Betrieb (Teilnehmer, Endgeräte, Abrechnungen, Statistik)
- Sicherheitsmanagement
- Netzkonfiguration, Netzbetrieb und Performance Management
- Wartungsarbeiten

Die Netzkontrolle kann in einem oder mehreren Netzwerk-Management-Zentren (*Network Management Centre*, **NMC**) zentralisiert werden. Die Betriebs- und Wartungsfunktionen basieren auf dem standardisierten Konzept des *Telecommunication Management Network* (**TMN**). Das TMN bildet ein integriertes Netz mit eigenen Datenbanken, das dem Betreiber Überwachungs-, Steuerungs- und weitere Eingriffsmöglichkeiten bietet.

In GSM-Netzen sind neben dem HLR und VLR zwei weitere Datenbanken (AUC und EIR) definiert. Sie sind verantwortlich für verschiedene Aspekte der Systemsicherheit. Diese basiert im Wesentlichen auf der Überprüfung von Geräte- und Benutzeridentität. Entsprechend dienen die Datenbanken zur Teilnehmeridentifizierung und –authentifizierung sowie zur Geräteregistrierung (*Eberspächer et al., 2001*).

Das **AUC** enthält alle Informationen, die zum Schutz der Teilnehmeridentität und seiner Mobilkommunikation gegen Abhören sowie für die Nutzung seiner Berechtigung über die Funkschnittstelle erforderlich sind. Da diese Schnittstelle generell für Zugriffe anfällig ist, wurden besondere Maßnahmen getroffen, wie z.B. die Vergabe eines Authentifikationsschlüssels für jeden Teilnehmer und die Verschlüsselung der zu übertragenden Informationen. Authentifikationsalgorithmus und Verschlüsselungscode werden im AUC gespeichert und bei Bedarf nach festen Regeln zugänglich gemacht.

Das Gerätereister **EIR** ist eine zentrale Datenbank, in der Teilnehmer- (IMSI) und Gerätekennummern (IMEI) gespeichert sind. Die IMEI sind in drei Klassen organisiert. Der sogenannten weißen, schwarzen und grauen Liste. Die weiße Liste enthält alle gültigen Geräte, die schwarze umfasst die gestohlenen oder gesperrten Geräte und sollte in regelmäßigen Abständen von den Betreibern untereinander ausgetauscht werden. Die graue Liste beinhaltet Geräte, die fehlerhaft sind oder eine veraltete Softwareversion haben. Diese Geräte sind zwar nicht gesperrt und besitzen weiterhin Zugang zu den abonnierten Diensten, werden aber dem Netzbetreiber zur Kenntnis gebracht, um geeignete Maßnahmen treffen zu können (*Walke, 2000*).

2.1.3.2. UMTS entwickelt sich parallel zu GSM

Bei der Einführung von UMTS griffen GSM-Netzbetreiber auf die Netzelemente und die Architektur ihrer GSM-Netze und deren GPRS-Erweiterungen zurück. Man spricht diesbezüglich auch von einem „weichen“ Übergang von 2 G auf 3 G. Hierbei haben GSM und UMTS ein *gemeinsames Kernnetz* für die Vermittlung von Sprache und Daten sowie für die Abrechnung. Der laufende Ausbau von UMTS-Netzen führt neue Technologien ein, jedoch wird ein Parallelbetrieb von GSM und UMTS noch viele Jahre bestehen bleiben, genauso wie der Verkauf von Endgeräten, die nur GSM unterstützen (*Sauter, 2008; 2011*).

Abb. 2–20. zeigt eine kombinierte GSM-UMTS-Netzarchitektur in vereinfachter Darstellung. Sie lässt sich logisch unterteilen in das gemeinsame **Kernnetz** (Core Network, CN), die **Funkzugangsnetze** (Radio Access Network, RAN), bei UMTS oft auch als *Radio Network Subsystem* (RNS) bezeichnet, die **mobilen Endgeräte** (Mobile Equipment, ME) und die **(U)SIM-Karten** (UMTS Subscriber Identity Module, als Pendant zum SIM bei GSM).

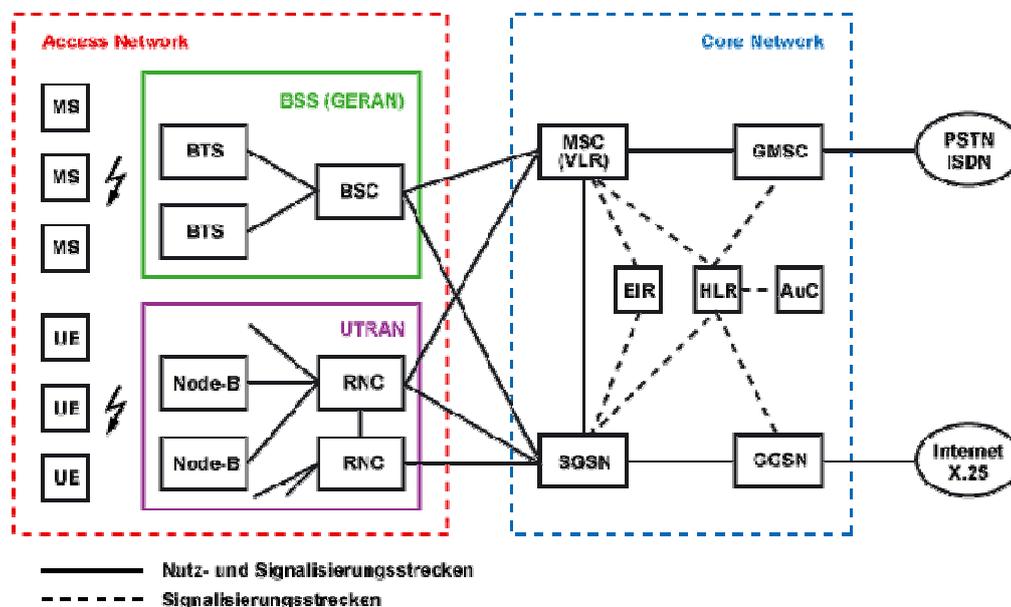


Abb. 2–20.: Basisarchitektur eines kombinierten GSM-UMTS-Netzes
(Schnabel, 2014v)

Innerhalb des Access Network gibt es für UMTS vergleichbare Komponenten wie bei GSM. Aufgrund ihrer weitergehenden Funktionalität und Neuerungen bei den Schnittstellen hat man jedoch andere Begriffe eingeführt. Mobiltelefone, in GSM-Netzen mit Mobile Station (MS) benannt, werden bei UMTS als **User Equipment** (UE) bezeichnet. Den Basisstationen (BTS) und dem zugehörigen Controller (BSC) bei GSM (Kap. 2.1.3.1) entspricht der **Node-B** (B steht für Base bzw. Basisstation) und der **Radio Network Controller** (RNC) bei UMTS. Die zur Funkübertragung dienende Festnetzinfrastruktur, das Radio Access Network (RAN), im UMTS-Teil bestehend aus Node-B und RNC, wird **UTRAN** (UMTS Terrestrial RAN), im GSM-Teil bestehend aus BTS und BSC, **GERAN** (GSM/EDGE RAN) oder auch Base Station Subsystem (**BSS**) genannt (Abb. 2–20.).

Im UTRAN sind im Gegensatz zum GERAN die Controller (RNC) untereinander vernetzt. Das ermöglicht z.B. Verbindungen von einem UE mit bis zu drei Node-B, die sich Gesprächs- und Datenströme untereinander aufteilen können (*Makrodiversität*). Auf diese Weise ist ein sogenanntes *Soft-Handover* zwischen mehreren Zellen bzw. Sektoren möglich (Walke et al., 2002). Diese Funktionalität in UMTS-Netzen hat natürlich auch einen wesentlichen Einfluss auf bestimmte **Ortsbestimmungsmethoden** für *Location Based Services* (Kap. 3.3.).

Das UTRAN kapselt alle Aufgaben, die mit der Übertragung von Informationen über Funk zusammenhängen. So soll nur durch einen Austausch bzw. eine Erweiterung des RAN die Möglichkeit bestehen, weitere Funkschnittstellen zu unterstützen. Mittels **UMA** (*Unlicensed Mobile Access*) versuchen Mobilfunkhersteller und Netzbetreiber, z.B. über die Initiative **H2U** (*Higher Capacity to*

UMTS), lizenzfreie Standards aus den Local und Personal Area Networks, wie *WLAN* und *Bluetooth*, in das Mobilfunknetz zu integrieren (Schnabel, 2014i). Mobile Endgeräte, die zusätzlich mit diesen Technologien ausgestattet sind, können somit unterbrechungsfrei mit den entsprechenden Access-Points kommunizieren. Dies funktioniert, da die unterschiedlichen Funkbereiche mit einem *netzübergreifenden Roaming* verbunden sind, das ein entsprechendes Handover ermöglicht (Abb. 2–21.).

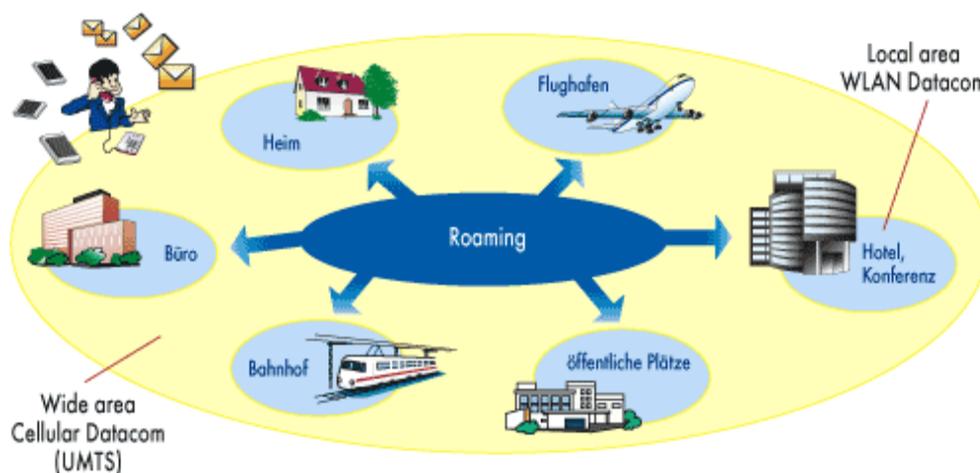


Abb. 2–21.: Roaming-Prinzip bei UMA (Ovrebø und Schwan, 2002)

Konzentrierte man sich ursprünglich darauf, HiperLAN/2-Systeme an UMTS anzubinden, so gab man in Europa bald dem WLAN-Standard nach 802.11 b/a/g/n/ac ff. den Vorzug (Kafka, 2001). Auf der Suche nach noch flexibleren Konzepten wurde nachfolgend die Technik der **Femtozellen** entwickelt. Dies sind Kleinstzellen, vorläufig nach dem UMTS-Standard betrieben, die, über ein Gateway an das Heim- oder Firmennetzwerk angeschlossen, mittels Internet-Breitband mit dem Kernnetz eines Mobilfunkanbieters in Verbindung stehen (Abb. 2–22.). Somit belasten sie auch nicht sein Verbindungsnetzwerk zum nächsten RNC (Backhaul). Gemäß der Anwendungszielrichtung werden Femtozellen auch als **Home-Node-B** (HNB) bezeichnet. Eine Integration in Geräte mit einem WLAN-Access-Point, Router, Switch und einer Firewall für DSL-Anschlüsse ist bereits gelungen.

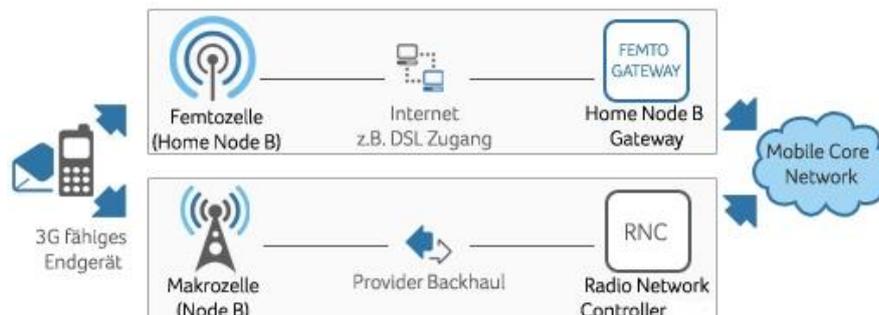


Abb. 2–22.: Anbindung von Femtozellen an das UMTS-Kernnetz (LTEmobile, 2014)

Obwohl UMA und UMTS-Femtozellen vom 3GPP (Third Generation Partnership Projekt) schon standardisiert wurden, erwartet man eine erfolgreiche Marktumsetzung erst dann, wenn die Netto-

Übertragungsraten im Funk mit jenen durchschnittlicher DSL-Anschlüsse zusammenpassen. Dies gelingt mit HSPA der letzten Generation, HSPA+ und jedenfalls LTE. In städtischen Gebieten ist das vergleichsweise einfach umzusetzen, da UMTS-Mobilfunk laufend ausgebaut wird. Nicht jedoch am Lande, wo GSM mit EDGE, wenn überhaupt, noch lange das Maß aller Dinge sein wird (*Tab. 2–1.*). Mit der Femto-Technik lassen sich hochintegrierte „Heimzellen“, sowohl für den klassischen Datenverkehr ins Internet als auch zum Telefonieren (gekoppelt mit VoIP), einsetzen (*LTEmobile, 2014*).

Für die **Ortsbestimmung** in Mobilfunknetzen ist diese Entwicklung von enormer Bedeutung. UMTS-Femtozellen haben einen Aktionsradius von ca. 50 m. Sie würden somit durch Zellidentifikation (Methode Cell-ID, *Kap. 3.3.2.*) und zugeordneter Adresse z.B. wesentlich dazu beitragen, die Genauigkeitsanforderungen an die *automatische Standortbestimmung* bei Notrufen mit Mobilgeräten auf einfachere Art zu erfüllen (E-911 in den USA, E-112 in Europa, *Kap. 3.1.2.* und *Kap. 3.1.3.*).

Das **Kernnetz** (CN) von UMTS ist ein Weitverkehrsnetz, das sowohl Gespräche als auch Daten zum jeweiligen Ziel transportiert (*Abb. 2–20.*). Zu diesem Zweck enthält das CN eine Vielzahl von Vermittlungseinrichtungen und Übergänge zu anderen Netzen, z.B. dem klassischen Festnetz, dem ISDN (*Integrated Services Digital Network*), dem Internet oder Datex-P (X.25). Weiters sind Datenbanken vorhanden, die zur Mobilitäts- und Teilnehmerverwaltung dienen sowie für die Abrechnung genutzt werden. Die Verwaltung des CN und des RAN erfolgt durch Einrichtungen des Netzmanagements (*Operations and Maintenance Center, OMC*), das ebenfalls im CN angesiedelt ist. In einem kombinierten GSM-UMTS-Netz ist vieles davon bereits aus dem GSM-Teil (*Kap. 2.1.3.1.*) und den GPRS-Erweiterungen vorhanden (*Walke, 2000; UMTSlink, 2009d*).

Ein **MSC** (*Mobile Services Switching Center*) ist ein Knoten, der kanalvermittelte Verbindungen (auch *Circuit Switched, CS*, genannt) verwaltet und diese über ein **GMSC** (*Gateway Mobile Services Switching Center*) an das Festnetz und andere Mobilfunknetze weiterleitet bzw. von dort entgegen nimmt, wie das schon in GSM-Netzen vonstattenging. Ein **SGSN** (*Serving GPRS Support Node*) behandelt paketvermittelte Verbindungen (*Packet Switched, PS*) und erfüllt dabei ähnliche Aufgaben wie die Knoten MSC und VLR im kanalvermittelten Teil. Hier wird auch die **aktuelle Position eines Teilnehmers** gespeichert, so dass ihm ein ankommendes Datenpaket zugestellt werden kann. Neben Routingfunktionen übernimmt der SGSN auch die Authentifizierung und hält eine lokale Kopie der Teilnehmerinformationen gespeichert.

Der Übergang in andere Paketdatennetze, wie z.B. das Internet, erfolgt im **GGSN** (*Gateway GPRS Support Node*). Die für den Betrieb der paketvermittelnden Übertragung notwendigen Informationen werden in einem **GPRS-Register** (GR) gespeichert. Das ist eine Datenbank, die Teil des HLR ist, und z.B. die Berechtigungen eines Teilnehmers für den Zugang ins Internet beinhaltet. Die Elemente HLR, VLR, EIR und AuC sind aus dem GSM-Bereich bekannt und erfüllen auch im UMTS-Netz ihre diesbezüglichen Aufgaben (*Kap. 2.1.3.1., (Walke, 2000)*).

Um in UMTS-Netzen hohe Übertragungsraten von 2 MBit/s und darüber hinaus zu realisieren, wurde und wird auch das Kernnetz sukzessive angepasst (*Schnabel, 2014v*). Ziel ist die Umstellung auf ein reines **IP-Kernnetz** (IP-CN), in dem dann auch die Sprache mit Paketen übertragen wird (*Voice over IP, VoIP*). Die klassische Leitungsvermittlung wird hierbei zugunsten der Paketvermittlung verschwinden. Im Zuge dessen werden bestehende Knoten des Kernnetzes zusammengefasst und neue hinzugefügt.

Zentraler Signalisierungsknoten in einem IP-CN ist die *Call State Control Function (CSCF)*, die mit anderen CSCF-Knoten und den Mobilstationen kommuniziert und hierbei auf die *Home Subscriber Server (HSS)* zugreift, wo alle früheren Datenbankfunktionen mit nutzer- und dienstespezifischen Inhalten zusammengefasst sind. Der Übergang von der Paketvermittlung (VoIP) in bestehende ISDN/PSTN-Netze erfolgt durch das *Media Gateway (MGW)*. Die Verbindung zu anderen Mobilfunknetzen ohne IP-CN wird über ein *Roaming Signalling Gateway (R-SGW)* durchgeführt (Walke et al., 2002).

Die **Standardisierung und Einführung von UMTS** erfolgte in mehreren Phasen. Die erste davon (Release 99) unterscheidet sich von GSM (Kap. 2.1.4.2.) vor allem durch die neue Funkzugriffstechnik *Wideband CDMA (W-CDMA)*. Wesentliche Merkmale dieser sind höhere Datenübertragungsraten und die Möglichkeit mehrere Verbindungen zwischen einem Mobilgerät und dem Funknetz gleichzeitig aufzubauen (UMTSlink, 2009d). Beides ist von entscheidender Bedeutung für die Implementierung von **Ortsbestimmungsmethoden** für *Location Based Services* in UMTS-Mobilfunknetzen.

Um die unterschiedlichen Herstellerinteressen bei der Entwicklung der UMTS-Spezifikationen zu berücksichtigen, wurden zwei unterschiedliche Betriebsmodi standardisiert (Abb. 2–5.). Im **UTRA-FDD-Modus** (*Frequency Division Duplex*) werden beim Senden der Mobil- und Basisstationen verschiedene Frequenzbereiche verwendet. Man spricht von *gepaarten Frequenzbändern* bzw. *-paketen*, wobei die Trennung von Up- und Downlink durch die Frequenz realisiert ist. Beide Bänder haben eine Gesamtbreite von 5 MHz, über die bei UMTS in Europa die Signale mittels **IMT-DS** (*Direct Spread* oder auch mit *Direct Sequenz* bezeichnet) vermittelt werden (Sauter, 2008; 2011).

Hierbei wird zur Unterscheidung der einzelnen *Teilnehmersignale* bzw. *physikalischen Kanäle* eine **Signalspreizung** mit verschiedenen *Speizcodes* (Channelizationcodes) über das ganze Frequenzband durchgeführt, indem jedes zu übertragende Bit mit einer höherratigen Bitfolge multipliziert wird. D.h. mehrere Teilnehmer senden im FDD-Modus zur selben Zeit im gleichen Frequenzband, aber mit unterschiedlichen Spreizcodes. Das gespreizte Signal wird bei UMTS weiters mit **QPSK** (*Quaternary* oder auch *Quadrature Phase Shift Keying* genannt) moduliert und übertragen. Der Empfänger kann anhand des speziellen Spreizcodes das für ihn bestimmte Signal wieder herausfiltern. Dieses Verfahren der Trennung der einzelnen Kanäle auf Code-Basis wird auch durch seine Bezeichnung *Code Division Multiple Access (CDMA)* für den Vielfachzugriff (auch *Multiplexing* genannt) ausgedrückt.

Im **UTRA-TDD-Modus** (*Time Division Duplex*) senden die Mobil- und Basisstationen im selben (*ungepaarten*) *Frequenzband* von ebenfalls 5 MHz, jedoch zu unterschiedlichen Zeiten hintereinander, um Up- und Downlink zu trennen. Die Vielfachzugriffe bei UMTS beruhen, zeitlich betrachtet, auf einem bestimmten Schema, eingeteilt in *Zeitrahmen* von 10 ms Dauer. Ein solcher Rahmen wiederum ist gegliedert in 15 *Zeitschlitze* zu je 666,7 μ s. Bei TDD sind diese so konfiguriert, dass innerhalb eines Rahmens einige davon (mindestens einer) für den Uplink und die anderen (wieder mindestens einer) für den Downlink verwendet werden. Der Wechsel zwischen Up- und Downlink geschieht am sogenannten Umschaltepunkt (*Switching Point*). Innerhalb eines Zeitrahmens kann es, je nach Festlegung, auch mehrere dieser Punkte geben. Durch das Verhältnis von Up- zu Downlink-Slots binnen eines Zeitrahmens können sowohl *symmetrische* wie auch *asymmetrische Datenraten* für ver-

schiedene Dienste eingestellt werden. Dies ist vor allem bei einer Verbindung in das Internet von großem Vorteil (*Sauter, 2008; 2011*).

Im Gegensatz zum FDD-Modus ist bei TDD ein *physikalischer Kanal* (Gesprächs- oder Datenübertragung) also nicht nur durch einen Spreizcode, sondern zusätzlich auch durch einen Zeitschlitz gekennzeichnet. Durch die Verwendung geeigneter Codes können in einem Zeitschlitz auch mehrere physikalische Kanäle gleichzeitig realisiert werden.

Modulationsart und –rate sowie die Rahmendauer und der Frequenzkanal-Abstand sind im FDD- und TDD-Modus gleich. Die Einteilung der Zeitrahmen in Zeitschlitze dient im FDD-Modus jedoch nicht zur Trennung von Teilnehmersignalen, sondern ausschließlich zur Realisierung periodischer Funktionen. Diese werden z.B. zur *Leistungssteuerung* und zur *Anpassung der Übertragungsrate* eingesetzt.

Ein CDMA-System erfordert zur Vermeidung des sogenannten **Nah-Fern-Effektes** eine schnelle und präzise *Leistungssteuerung*. Dazu wird im FDD-Modus in jedem Zeitschlitz ein Leistungssteuerungs-Kommando übertragen. Wenn beispielsweise durch eine mangelhafte Synchronisation zwischen Sender und Empfänger oder nur quasi-orthogonale Spreizcodes (worauf hier nicht weiter eingegangen werden soll) ein Übersprechen zwischen mehreren Codekanälen vorhanden ist (*Vielfachzugriffsinterferenz*), so steigt die Bitfehlerhäufigkeit eines der Basisstation fernen Mobilgerätes wesentlich stärker als die eines nahen (*Walke et al., 2002*).

Dieser störende Beitrag der Vielfachzugriffsinterferenz wächst noch mit steigender Benutzerzahl innerhalb einer Zelle und wenn die Empfangsleistung anderer Benutzer wesentlich höher ist, als die des betrachteten. Im ungünstigsten Fall kann dieser Effekt zu einer Unterbrechung der Übertragung führen. Bei **Methoden der Ortsbestimmung** mittels Mobilfunk, die darauf angewiesen sind, mindestens drei (besser noch mehr) Basisstationen mit aufrechten Funkverbindungen um das betroffene Mobilgerät zur Verfügung zu haben (z.B. für die Abschätzung von Distanzen, *Kap. 3.3.5.*), kann dies zu erheblichen Problemen führen. In schwierigen Situationen lässt sich somit ohne weitere „technische Tricks“ keine Positionslösung mittels Tri- bzw. Multilateration erzielen.

2.1.3.3. LTE dient für schnelle Internetverbindungen

Der große Technologiewandel bei LTE (*Abb. 2–11.*) hat einen entscheidenden Einfluss auf implementierte **Ortsbestimmungsmethoden** in Mobilfunknetzen bzw. bietet viele Möglichkeiten bei neuen Netzaufbauten. Darum sei hier ein kurzer Einblick in die Mobilfunktechnik von LTE in Hinblick auf *Location Based Services* gegeben.

Durch den Einsatz des gegenüber UMTS (*Kap. 2.1.3.2.*) wesentlich leistungsfähigeren Vielfachzugriffsverfahrens **OFDMA** (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*), verbesserter Modulationstechniken wie **16/64 QAM** sowie durch die Verwendung von **MIMO** (Mehrfachantennen), sind in Richtung Mobilgerät Übertragungsraten bis *326,4 MBit/s* (4 x 4 MIMO) bzw. *172,8* (2 x 2) bei einem *20 MHz* breitem Kanal spezifiziert. Im Uplink werden für dieselbe Bandbreite Raten bis *86,4 MBit/s* angegeben, wobei hier als Zugriffsverfahren **SC-FDMA** (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) zum Einsatz kommt. Im Vergleich zu UMTS, das mit einer konstanten Bandbreite von maximal *5 MHz* pro Übertragungskanal arbeitet (GSM verwendet nur *0,2 MHz*), lassen

sich für LTE bei ebenfalls 5 MHz Werte bis zu 43 MBit/s im Downlink (2x2 MIMO) angeben (Holma und Toskala, 2009; Sauter, 2013).

MIMO mit Verwendung von je 4 Antennen bei Sender und Empfänger (4x4) wird anfangs hauptsächlich in *Femtozellen* zum Einsatz kommen, da hier die zu überbrückende Funkstrecke am kürzesten, der Breitbandbedarf jedoch am höchsten ist. Weitere Einsatzmöglichkeiten bilden *mobile Access-Points* für WLAN, die per LTE eine reine Datenverbindung in das Internet zur Verfügung stellen. Auch direkte Funkverbindungen in das Mobilnetz mittels ansteckbarer Antennen für PCs, Laptops, Tablets u.ä. sind möglich.

LTE bildet mit seinem stark weiterentwickelten Kernnetz **SAE** (*System Architecture Evolution*), auch als **EPC** (*Evolved Packet Core*) bezeichnet, und der neuen Luftschnittstelle **E-UTRA** (*Evolved UTRA*) ein „All-IP-Network“ (**AIPN**). Dieses kann Verbindungen und unterbrechungsfreie Handover sowohl zu allen 3GPP- und 3GPP2-Technologien (wie GSM, UMTS, HSPA(+), CDMA) als auch zu WiFi- und WiMAX-Netzen sowie drahtgebundenen DSL-Techniken (wie ADSL, VDSL) herstellen bzw. durchführen (Rysavy-Research, 2009; LTEmobile, 2014; Wikipedia, 2014e).

Zusammen mit den sehr niedrigen Latenzzeiten (Abb. 2–12.) eignet sich LTE somit besonders für den Einsatz von zeitkritischen Anwendungen in gemischt breitbandig vernetzten Umgebungen, die auch sehr datenintensiv sein können. Dies sind z.B. das Übertragen von High Definition Videos aus digitalen Videotheken (Video on Demand, VoD), Video- und Sprachtelefonie über Datenverbindungen (VoIP, hier auch mit VoLTE bezeichnet), mobiles Fernsehen über Breitband (IPTV) und mobile Computerspiele in Echtzeit. Als spezielle Applikationen aus dem Bereich der **Location Based Services** lassen sich beispielsweise alle *Navigationssysteme* mit Karten-, Luftbild- oder 3D-Modelldaten in Echtzeit und *erweiterte Notrufdienste der nächsten Generation* unter Einbeziehung von Bild- und Videodaten (in den USA als Next Generation 911, **NG-911**, bezeichnet) anführen (UMTS-Forum, 2009; Wikipedia, 2014n).

2.1.4. Wichtige Mobilfunkcharakteristika für die Ortsbestimmung

2.1.4.1. Ein Funknetz aus Zellen

Einem *Mobilfunknetz der 2. Generation*, wie z.B. GSM, steht aufgrund der begrenzten Frequenzbänder nur eine relativ kleine Anzahl von Gesprächskanälen zur Verfügung. Um trotzdem eine möglichst große Anzahl von Teilnehmer bedienen zu können, müssen die Frequenzen räumlich mehrfach genutzt werden. Diese Frequenzwiederverwendung führte zur Entwicklung der **Zellulartechnik** (Eberspächer et al., 2001). Die wesentlichen Charakteristika dieser Technik für GSM-Netze sind:

- Das abzudeckende Gebiet wird in **Zellen** (einzelne Funkzonen) aufgeteilt (Abb. 2–23.). Diese Zellen werden vereinfacht als Hexagone modelliert und die Basisstation wird meist in der Mitte der Zelle angenommen. In der Realität sind die Zellen jedoch nicht getrennt und regelmäßig verteilt, sondern bilden eine inhomogene, teilweise auch mehrfach überdeckende Topologie (Abb. 2–24.).
- Jede Zelle i erhält eine Untermenge von **Frequenzen** fb_i aus der dem jeweiligen Mobilfunknetz verfügbaren Gesamtmenge zugewiesen. Keine zwei direkt benachbarten Zellen dürfen dieselben Frequenzen verwenden, da sonst starke Gleichkanalstörungen zu erwarten wären.
- Erst im Abstand D (**Frequenzwiederholabstand**) wird eine Frequenz aus dem Bündel fb_i erneut verwendet. D.h. Zellen im Abstand D zur Zelle i erhalten wiederum jeweils eine oder auch alle Frequenzen aus dem Bündel fb_i zugewiesen. Wenn D ausreichend groß gewählt wird, bleiben die Gleichkanalstörungen klein genug, um die Sprachqualität nicht zu beeinträchtigen.
- Beim Übergang von einer Zelle zur nächsten erfolgt auch bei laufendem Gespräch ein automatischer Kanal- und somit Frequenzwechsel (**Handover**, Kap. 2.1.4.3.), sodaß eine aktive Verbindung über Zellgrenzen hinweg aufrecht erhalten werden kann.

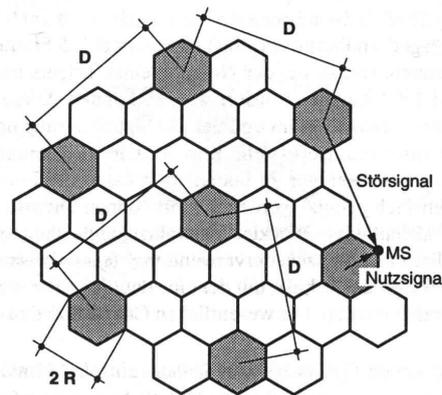


Abb. 2–23.: Modell eines zellularen Mobilfunknetzes (Eberspächer und Vögel, 1997)

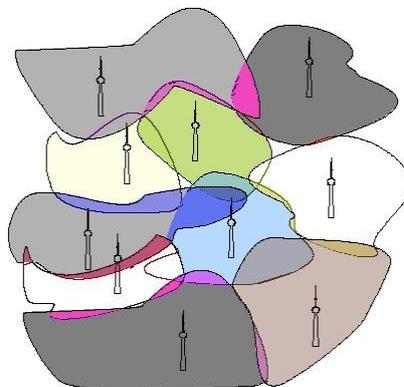


Abb. 2–24.: Topologie eines zellularen Mobilfunknetzes unter realen Bedingungen (Jobmann, 1999)

Weiters ist eine optimale *funktechnische Abdeckung* eines bestimmten Gebietes, abhängig von Last, Teilnehmerverhalten und Morphostruktur, nur durch verschiedene Konfigurationen der Basisstationen (BTS) möglich. Die wichtigsten sind im Folgenden dargestellt (Heine, 1998).

Die **Standardkonfiguration**, wie sie Abb. 2–25. zeigt, wird am häufigsten verwendet. Alle BTS haben verschiedene *Cell Identities* (Cell-ID). Einige, mitunter auch nur eine einzige BTS, bilden eine *Location Area* (LA, Kap. 2.1.3.1.; die Abbildung zeigt LA mit 1, 3 und 5 BTS). Insbesondere in dicht besiedelten Ballungsgebieten mit hohem Verkehrsaufkommen werden verstärkt die beiden nächsten Konfigurationen eingesetzt.

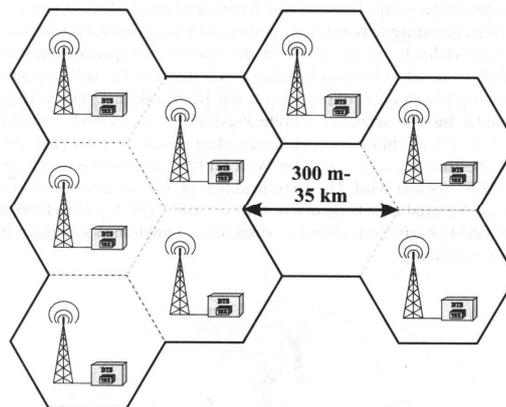


Abb. 2–25.: BTS-Standardkonfiguration (Heine, 1998)

Bei **Schirmzellenkonfigurationen** dient eine BTS mit hoher Sendeleistung und hoch installierter Antenne als sogenannte *Schirmzelle* für eine Anzahl weiterer BTS mit geringerer Sendeleistung (Abb. 2–26.). Obwohl die in der Schirmzelle eingesetzten Frequenzen aus Interferenzgründen in den anderen BTS dieses Gebietes nicht verwendet werden können, führt die Schirmzellenkonfiguration unter bestimmten Bedingungen zur Entlastung und Verbesserung eines Netzes.

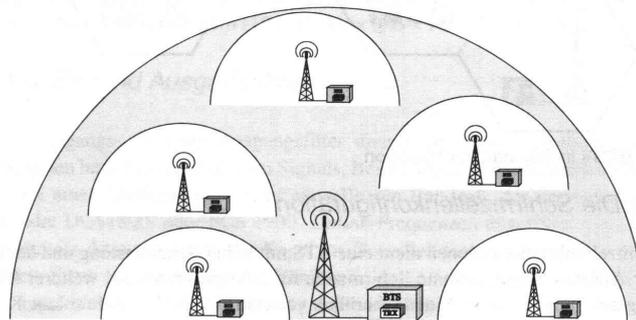


Abb. 2–26.: BTS-Schirmzellenkonfiguration (Heine, 1998)

In städtischen Gebieten befinden sich viele Mobilgeräte (MS) in Autos auf Schnellstraßen, Autobahnen oder in Zügen. Für diese sich schnell bewegenden Teilnehmer müssten bei einem Kleinzellennetz permanent *Handover* von einer BTS zur nächsten durchgeführt werden. Wenn ein Zelldurchmesser aufgrund der Bevölkerungsdichte und Bebauung nur noch *500 m* oder weniger betragen kann, würden sich daraus unzumutbare Empfangsbedingungen für einen Teilnehmer und eine starke Signa-

lisierungslast für das Netz ergeben. Andere MS wiederum, die mehr oder weniger statisch sind, bekommen im städtischen Umfeld in einer Kleinzelle bessere Funkbedingungen.

Die Lösung ist eine Koexistenz einer oder weniger Schirmzellen mit einer großen Zahl von Kleinzellen. Indem sich die Großzellen hauptsächlich um den Verkehr der sich schnell bewegendenden MS kümmern, bleiben sie selbst frei von Überlast durch statische Teilnehmer und entlasten im Gegenzug das Signalisierungsaufkommen für das Kleinzellennetz. Die Geschwindigkeit eines Teilnehmers lässt sich aus der Veränderungsrate der *Timing Advance* (TA, Kap. 2.1.4.3.) bestimmen, deren aktueller Wert in der zuständigen Basisstationssteuerung (BSC) alle *480 ms* erneuert wird. Die Entscheidung, ob die Schirmzelle oder eine der Kleinzellen eine Verbindung übernimmt, trifft dann die BSC.

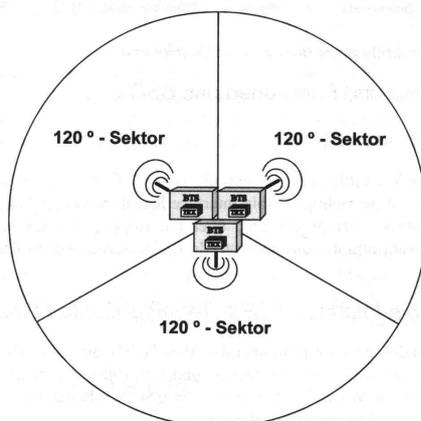


Abb. 2–27.: Sektorisierte BTS (Heine, 1998)

Von **sektorisierten** bzw. **collocated Zellen** spricht man, wenn die Sende- und Empfangsantennen an einem Standort nur einen bestimmten Sektor, meist 120° , abdecken (Abb. 2–27.). Wie die Schirmzellenkonfiguration wird auch diese vor allem in Ballungsräumen eingesetzt. Aus funktechnischer Sicht lassen sich für einen Sektor Frequenzen verwenden, die in einem anderen Interferenzen mit Nachbarzellen verursachen könnten. Aus diesem Grund ermöglicht die Sektorisierung von Zellen eine Entlastung der angespannten Frequenzkapazitäten, insbesondere in Großstädten.

Tab. 2–4. gibt Auskunft über weitere **GSM-Parameter**, die einen wesentlichen Einfluss auf die Netzcharakteristik haben.

Parameter	GSM-900	GSM-1800
Frequenzbereich	2 x 25 MHz 890 – 915 MHz Uplink 935 – 960 MHz Downlink	2 x 75 MHz 1710 – 1785 MHz Uplink 1805 – 1880 MHz Downlink
Zellgröße (Distanz MS – BTS)	bis 35 km	bis 8 km
max. Sendeleistung der MS	2, 5, 8, 20 W optional zulässige Werte nach GSM 2.06 auch 0,8 und 1 W	0,25 – 1 W
max. Geschwindigkeit der MS	250 km/h	250 km/h

Tab. 2–4.: GSM-Parameter (Jobmann, 1999)

Betrachtet man die Gesamtheit aller Zellen, also das Mobilfunknetz als Ganzes, so lässt sich weiters, bezogen auf einen bestimmten Anbieter, unterscheiden zwischen der **Netzabdeckung** und dem **Versorgungsbereich** (Schnabel, 2014f). Erstere gibt an, wie viel Prozent der Gesamtbevölkerung (z.B. eines Landes) das Funknetz nutzen können (meist bezogen auf ihren Wohnsitz). Zweiterer stellt die geographische Reichweite des Netzes als Fläche dar, die von allen Basisstationen insgesamt versorgt wird. Dieser Unterschied ist z.B. von wesentlicher Bedeutung bei der Beurteilung von Genauigkeitsanforderungen seitens der FCC für die um automatische Standortbestimmungen erweiterten mobilen Notrufe in den USA (E-911, Kap. 3.1.2.).

2.1.4.2. Der Übertragungskanal und die Effizienz von GSM

Beim Funkkanal handelt es sich um ein von vielen Teilnehmern in einer Zelle gemeinsam genutztes Übertragungsmedium, wobei die Mobilfunkgeräte untereinander um die Ressource Frequenz konkurrieren. Um die verfügbaren Frequenzbänder in nicht kollidierende Gesprächskanäle aufzuteilen, werden spezielle **Vielfachzugriffsverfahren** (*Multiple Access*) eingesetzt. Vorausgehend sind hierbei alle Sende- und Empfangssignale (Uplink und Downlink) durch **Frequenzduplex** (*Frequency Division Duplex*, FDD) auf verschiedene Frequenzbereiche verteilt (Abb. 2–28.).

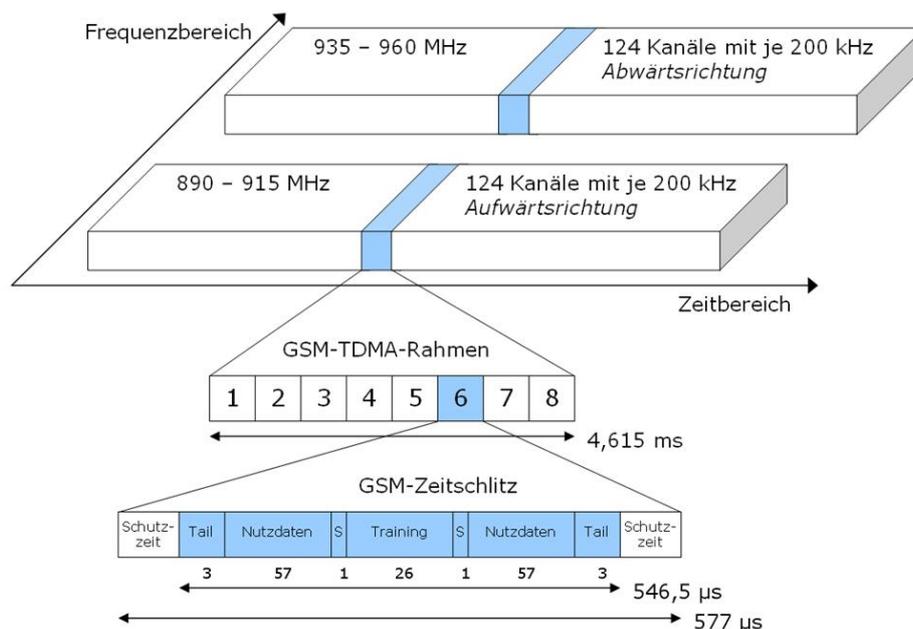


Abb. 2–28.: Vielfachzugriffsverfahren bei GSM-900 (Gutmann, 2007)

GSM verwendet beim Vielfachzugriff eine Kombination von **FDMA** (*Frequency Division Multiple Access*) und **TDMA** (*Time Division Multiple Access*), ein sogenanntes Mehrträger-TDMA-Vielfachzugriffsverfahren (*Multi-Carrier-TDMA*), (Mobilkom, 2000b; Eberspächer et al., 2001). In einem Band von 25 MHz Breite (GSM-900) sind 124 einzelne Kanäle mit 200 kHz Bandbreite (124 einzelne Trägerfrequenzen) untergebracht, wobei jeder dieser Frequenzkanäle wiederum 8 TDMA-Gesprächskanäle (Zeitschlitz) zu je 577 µs enthält. Ein **Übertragungskanal** ist somit durch seine Träger-

frequenz und seinem jeweils zur Verfügung stehenden, periodisch wiederkehrenden, Zeitschlitz charakterisiert.

Die **Ausbreitung von Funkwellen** im Raum ist sehr komplex und lässt sich aufgrund der in der Regel unbekanntnen Randbedingungen in der Natur selten berechnen. Je nach Frequenz und Umgebung breiten sich Funkwellen über unterschiedliche Wege aus (*Mehrwegeausbreitung, Abb. 2–29.*). Dies ist bedingt durch die physikalischen Vorgänge der Reflexion, Beugung sowie Streuung.

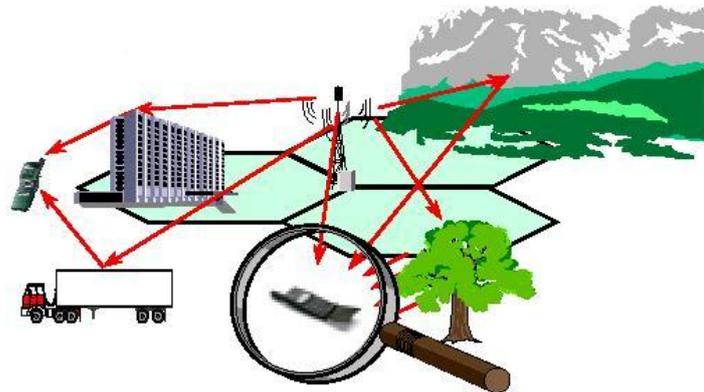


Abb. 2–29.: Überlagerung mehrerer Ausbreitungspfade beim Mobilfunk (Jobmann, 1999)

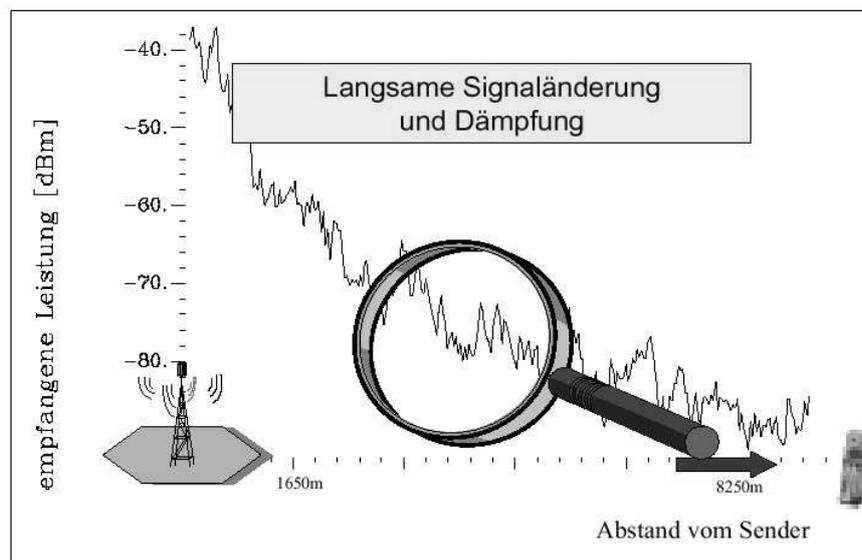


Abb. 2–30.: Slow Fading des Mobilfunksignals (Jobmann, 1999)

Ein weiteres typisches Phänomen bei der Wellenausbreitung bildet das *Fading* bzw. der *Schwund*. Damit bezeichnet man die Schwankungen der Amplitude, die durch ausbreitungsspezifische Störungen entstehen. Gesendete Signale kommen über verschiedene Pfade phasenverschoben am Empfänger an und überlagern sich dort. Das Signal wird dabei durch frequenzselektive und Mehrwegeausbreitung beeinflusst. Diese Effekte müssen durch die Funkempfänger (Mobilgeräte) ausgeglichen werden. Sie sind jedoch umgebungsbedingt durchaus erwünscht, da dadurch z.B. in städtischer Ver-

bauung, mit wenig freier Sicht zu den Basisstationen (*Line of Sight*), Funkschatten ohne Empfang wesentlich reduziert werden.

Der **Mobilfunkkanal** wird somit, neben der bekannten mediumsbedingten Dämpfung, von bestimmten Störungen beeinflusst (*Jobmann, 1999*):

- *Slow Fading* (durch Abschattungen, *Abb. 2–30*.)
- *Fast Fading* (durch Mehrwegeausbreitung, *Abb. 2–31*.)
- *Dopplerverschiebung* (bei sich bewegenden Teilnehmern)

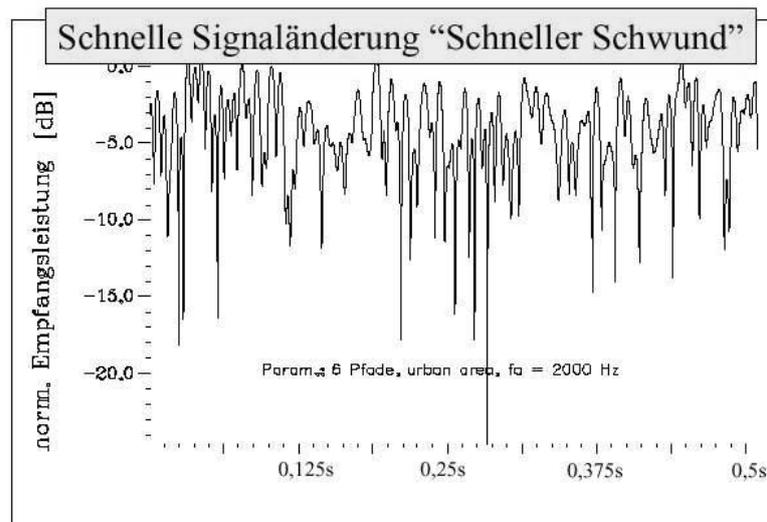


Abb. 2–31.: *Fast Fading* des Mobilfunksignals (*Jobmann, 1999*)

Es wurden jedoch im Mobilfunksystem auch einige Maßnahmen gesetzt, die die **Effizienz der GSM-Technik** für die Kommunikation und Datenübertragung steigern (*Jobmann, 1999*):

- Die Kontrolle der Funkfeldstärke (*Power Control*) ermöglicht es, dass sowohl die Basis- als auch die Mobilstation nur den notwendigen Leistungsbedarf für eine gesicherte Übertragung von Sprache und Daten aufweisen. Dadurch wird vor allem das Problem der Interferenz verringert.
- *Frequency Hopping*, d.h. das permanente Wechseln der Trägerfrequenz, erhöht die Funkstabilität und verringert die Interferenz- und Störanfälligkeit.
- *Diskontinuierliche Übertragung der Sprache* mit dem Voice Activity Detection (VAD) Algorithmus verringert ebenfalls Interferenzen.
- Ein *Handover* wird *durch die Mobilstation assistiert*. Die MS misst ständig die Funkfeldstärke auch zu Nachbarzellen und leitet diese Daten an die aktuelle Basisstation weiter.

2.1.4.3. Timing Advance und Handover

In GSM-Netzen erwartet eine Basisstation (BTS) Bursts von den Mobilstationen (MS) in einem genau festgelegten festen Zeitraster. Solange BTS und MS nicht weit voneinander entfernt sind, funktioniert dieser Mechanismus gut. Mit steigender Entfernung jedoch müssen die Signallaufzeiten von Downlink- und Uplink-Bursts berücksichtigt werden (Abb. 2–32.). Die **Timing Advance** (TA, Zeitvorlauf) bezeichnet somit jene Zeitdauer, um die eine MS ihre Daten früher abschicken muss, als sie das Senden aufgrund der von der BTS empfangenen Bursts kalkulieren würde. Hierbei entsprechen geringe Entfernungen niedrigen und große Entfernungen hohen TA-Werten (Heine, 1998).

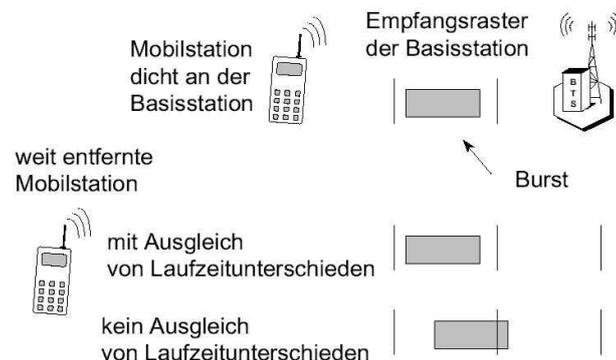


Abb. 2–32.: Timing Advance in GSM-Netzen
(Jobmann, 1999)

Der Einsatz der TA ermöglicht es demnach, dass die von der MS kommenden Bursts im richtigen Fenster und unverschoben von der BTS empfangen werden können. Die BTS kalkuliert die TA und teilt diesen Wert der verantwortlichen Basisstationssteuerung (BSC) mit. Die TA kann Werte zwischen 0 und 63 annehmen, was Entfernungen zwischen 0 und 35 km und einer Schrittweite von ca. 550 m entspricht. Zeitlich sind TA-Werte von 0 bis 232 μs möglich. Durch die Bewegung einer MS verändert sich die TA ständig, weshalb sie von der BTS periodisch neu bestimmt und über die BSC der MS mitgeteilt werden muss (Jobmann, 1999).

Ein **Handover** ist die Übergabe einer bestehenden Funkverbindung an eine neue Basisstation. Sie kann aus verschiedenen Gründen notwendig werden. Eine Handover-Entscheidung wird vom Netz gefällt, basierend auf verschiedenen Kriterien wie Empfangsfeldstärke, Kanalqualität, Entfernung der MS von der BTS, Verkehrslast der Zelle oder Wartungsarbeiten (Eberspächer et al., 2001).

Zur Vorbereitung eines Handovers gehört vor allem die Kanalvermessung. Eine MS registriert in regelmäßigen Abständen die Signalstärke ihres aktuellen Downlinks sowie die der benachbarten Basisstationen und sendet einen Messbericht an ihre aktuelle BTS. Netzseitig werden die Signalqualität im Uplink beobachtet, die Messergebnisse der MS ausgewertet und eine entsprechende Handover-Entscheidung getroffen (Abb. 2–33.).

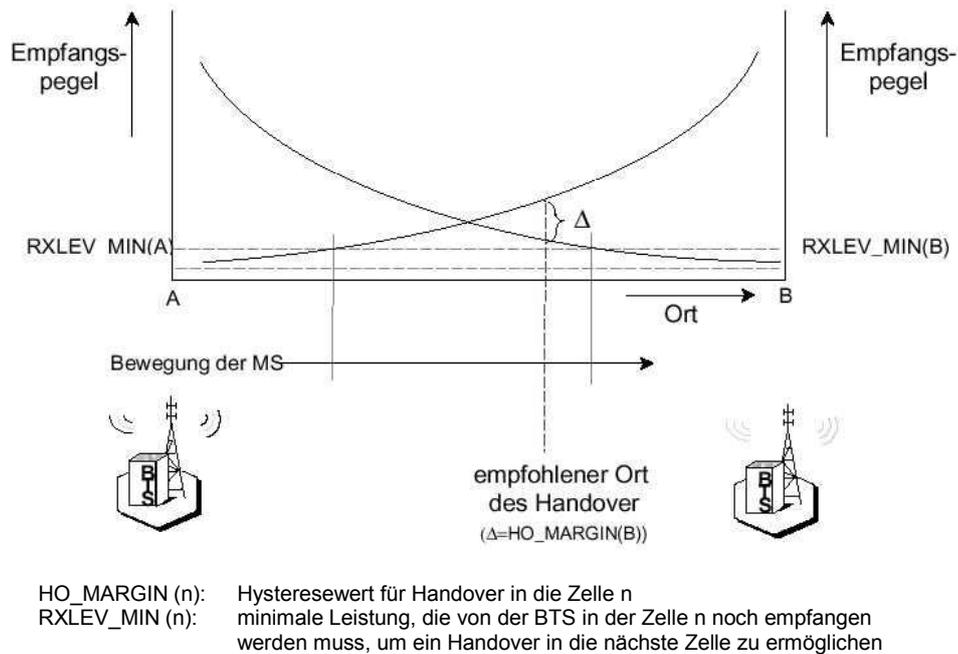


Abb. 2–33.: Handover-Hysterese bei GSM (Jobmann, 1999)

Prinzipiell können in GSM-Netzen drei **Handover-Mechanismen** notwendig werden (u.a. (Jobmann, 1999)):

- *Rescue Handover*: Wenn das Gespräch verlorenzugehen droht, mit der extremen Form, in der die MS mit einem Call Reestablishment versucht, das verlorene Gespräch wieder herzustellen.
- Handover aus globalen Qualitätsgründen (*Confinement Handover*): Dieses kann erfolgen, wenn zwar die Gesprächsqualität der einen Verbindung ausreichend ist, aber die Übergabe an eine andere Zelle eine wesentliche Verbesserung der Interferenzen bewirkt.
- *Traffic Handover*: Bei überlasteten Zellen können Handover ausgeführt werden, jedoch mit spezieller Vorsicht, da dadurch die Qualitätskriterien in den neu eingebuchten Zellen verschlechtert werden können.

2.1.4.4. Zusammengefasste Folgerungen

Es lässt sich festhalten, dass Optimierungen der Zellulartechnik vor allem dazu dienen, die Gesprächsqualität bzw. in zunehmendem Maße auch die Datenübertragung in Mobilfunknetzen als Kommunikationssysteme zu verbessern und möglichst vielen Teilnehmern einen Zugang zu bieten. Aus der Sicht eines *Navigationssystems* bzw. unterschiedlicher *Ortsbestimmungsmethoden* in einem zellularen Netz (Kap. 3.3.) beeinträchtigen jedoch grundsätzliche Prinzipien eines solchen in den meisten Fällen die Genauigkeit einer Ortung wesentlich. Um trotzdem eine entsprechende Qualität bei Standortbestimmungen zu erreichen, ist demgemäß ein mitunter sehr hoher Aufwand bei der Implementierung der jeweiligen Technik erforderlich.

Als Beispiele seien hier nochmals zusammenfassend die Mehrwegeausbreitung, die Schirmzellenkonfiguration, die Kontrolle der Funkfeldstärke und die Timing Advance angeführt:

- Ohne **Mehrwegeausbreitung** würden Kommunikationssysteme wie GSM, UMTS und LTE nicht funktionieren. Eine entsprechende Gesprächsqualität vorausgesetzt, ist es für die Beteiligten auch völlig unwichtig, über welche Wege sich die Funksignale zwischen MS und BTS ausbreiten. In der Regel tun sie es nicht in der direkten Sichtverbindung (*Line of Sight*), da diese eben nicht vorhanden ist. Für alle Ortsbestimmungsmethoden, die z.B. auf Laufzeitmessungen von Mobilfunksignalen beruhen, bedeutet jedoch genau dies eine wesentliche Verschlechterung der Genauigkeit, da die entsprechenden „Pseudostrecken“ stark verfälscht werden (*Kap. 5.3.*).
- **Schirmzellenkonfigurationen** bringen einige Vorteile für zellulare Kommunikationsnetze, wie in *Kap. 2.1.4.1.* beschrieben. Sie erschweren bzw. verschlechtern jedoch eine Ortsbestimmung mit jenen Methoden, die nur den Zellmittelpunkt und die -größe als Position angeben oder auf eine gute Schnittgeometrie von Messgrößen weniger benachbarter Zellen angewiesen sind.
- Die **Kontrolle der Funkfeldstärke** bildet ein wesentliches Merkmal in zellularen Netzen. Sie erhöht einerseits die Akkulaufzeit der Mobilfunkgeräte und somit die Gesprächs- und Stand-by-Zeiten, andererseits reduziert sie störende Interferenzen. Für all jene Ortsbestimmungsmethoden jedoch, die darauf angewiesen sind, Mobilfunksignale über (mehrere) Zellgrenzen hinweg empfangen zu können, um eine eindeutige Lösung zu berechnen bzw. durch Überbestimmung eine geforderte Genauigkeit zu erzielen, stellt eine jede vorausgehende Dämpfung der Signale eine Verschlechterung der Ortungssituation dar.
- Die **Timing Advance** ist ein GSM-Parameter, der direkt und indirekt auch für die Ortsbestimmung nützlich sein kann. Bei großen Zellen bzw. Sektoren kann er den Aufenthaltsbereich auf kreisringartige Flächen einschränken. Dies funktioniert jedoch nicht in Städten, denn da ist die TA in der Regel 0, ganz selten 1. Da sich aus der Änderungsrate der TA auf die Geschwindigkeit einer MS schließen lässt, kann ihr möglicher Aufenthaltsbereich mit Hilfe von intelligenten digitalen Karten (GIS) nachträglich noch wesentlich eingeschränkt werden, besonders in Zusammenhang mit Verkehrswegenetzen. Dies spielt z.B. eine große Rolle bei der Implementierung von Notrufsystemen mit integrierter Standortbestimmung, wie E-911 in den USA, E-119 in Japan und zukünftig E-112 bzw. eCall in Europa (*Staudinger und Haselgrübler, 2002*), *Kap. 3.1.2.* und *Kap. 3.1.3.*).

2.2. Das Global Positioning System als Beispiel für ein GNSS

Das NAVSTAR-GPS (*Navigation System with Timing And Ranging – Global Positioning System*, offiziell jedoch: *Navigational Satellite Timing And Ranging – GPS*) ist ein satellitengestütztes Radionavigationssystem und wurde primär für militärische Zwecke im Auftrag des Verteidigungsministeriums der USA entwickelt. Heute wird es zu den GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) gezählt, wie auch das russische GLONASS (*Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema*), das chinesische Compass/Beidou und das europäische Galileo. GPS erlaubt beliebig vielen, ruhenden oder bewegten, Nutzern zu jeder Zeit, an jedem beliebigen Ort der Erde – also zu Lande, zu Wasser

und in der Luft – und bei jedem Wetter eine absolute dreidimensionale Positions- sowie eine Geschwindigkeits- und Zeitbestimmung in Echtzeit (u.a. (Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Wikipedia, 2014j)).

Man unterscheidet bei GPS prinzipiell *zwei unterschiedliche Genauigkeitspotentiale* (u.a. (Bauer, 1997; 2003; 2011)):

- **Standard Positioning Service (SPS):**

SPS steht jedermann weltweit uneingeschränkt und ohne Entgelt zur Verfügung. Die absolute Genauigkeit lag bis Anfang Mai 2000, vor Abschaltung der Selective Availability (SA), bei ca. *100 m* (Kap. 2.2.3.3.).

- **Precise Positioning Service (PPS):**

PPS schöpft das Genauigkeitspotential von GPS zur Gänze aus. Der Nutzerkreis beschränkt sich jedoch auf speziell autorisierte, in der Regel militärische, Anwender.

2.2.1. Entwicklungsgeschichte

Das **Konzept der Satellitennavigation** wurde 1957, nach dem Start des ersten Satelliten (Sputnik), von Wissenschaftlern des Applied Physics Laboratory (APL) der John Hopkins Universität entwickelt. Die US-Navy griff diese Technologie auf, um die Navigationsgenauigkeit ihrer Schiffe und U-Boote zu erhöhen und betrieb dafür seit 1964 das satellitengestützte Ortungssystem **TRANSIT**. Dieses hatte darüber hinaus auch außerordentliche Bedeutung für die *geodätische Grundlagenforschung* und für zivile Anwendungen erlangt (Bauer, 1997; 2003; 2011).

Die Leistungsfähigkeit von TRANSIT war jedoch in einigen Punkten begrenzt. Eine ständige Ortung war nicht möglich, in Bewegung befindliche Nutzer erreichten nur bescheidene Genauigkeiten und eine dreidimensionale Positionsbestimmung konnte nur stationär durchgeführt werden. Aus diesen Gründen war sowohl die US-Navy als auch die Luftwaffe sehr daran interessiert, über ein noch genaueres Ortungssystem zu verfügen. Erstere förderte das Projekt **TIMATION**, das durch die Entwicklung der Atomuhren ab dem Jahre 1960 eine Verbesserung der *zweidimensionalen Ortung* anstrebte. Die Luftwaffe arbeitete gleichzeitig an einem anderen Konzept namens *System 621*, dessen wesentliches Merkmal das Bemühen um eine genaue *dreidimensionale Ortung* war. Um Mittel zu sparen, fasste das Verteidigungsministerium 1973 beide Aktivitäten zusammen, was die Geburtsstunde von NAVSTAR-GPS war (Thomä, 1996).

Im Juni 1977 wurde der *erste Testsatellit* mit der neuen Technik gestartet und vier weitere folgten 1978. Ende 1985 waren bereits sieben Prototypsatelliten im Einsatz, die zu Testzwecken täglich fünf Stunden lang Navigationsdaten lieferten. Der **Aufbau von GPS** lässt sich insgesamt in drei Phasen gliedern (u.a. (Bauer, 1997)):

- **Phase I (Überprüfungsphase, 1974 – 1979):**

Sie diente zur Untersuchung, ob die vorgesehene Konzeption geeignet ist, die Forderungen an das System zu erfüllen. Es erfolgten Starts einiger Testsatelliten, mit deren Hilfe der militärische Wert des GPS überprüft wurde.

- **Phase II (Entwicklungsphase, 1979 – 1985):**

Hierbei stand die technische Entwicklung des Systems im Vordergrund. Prototypsatelliten wurden gestartet und die Empfangsanlagen stetig verbessert.

- **Phase III (Ausbauphase, 1985 – 1993):**

Das GPS wurde nach und nach voll ausgebaut. Mitte 1992 befanden sich bereits 17 Satelliten in ihren Orbits und laufend kamen neue hinzu.

Satellitentyp	Starts	Funktionsdauer [Jahre]	Anmerkung
Block I	1978 – 1985	4,5	nicht mehr aktiv
Block II	1989 – 1990	7,5	
Block II A	1990 – 1997	7,5	
Block II R	1997 – 2005	10	
Block II R-M	2005 – 2009	13	L2C, L1/2M
Block II F	ab 2010	15	L5C, Inertialsysteme
Block III A	ab 2017 (?)		L1C

Tab. 2–5.: Typen von GPS-Satelliten (Autor)

Es können mehrere **Typen von GPS-Satelliten** unterschieden werden (Tab. 2–5.). Die **Block I** Satelliten dienten zunächst der Erprobung und wurden zwischen 1978 und 1985 in ihre Umlaufbahnen gebracht. Es folgten zwischen 1989 und 1990 die **Block II** Satelliten für die erste offizielle Ausbaustufe. Erstmals gab es damit die Möglichkeit, den Nutzern die gesendeten Signale nicht mehr vollständig zur Verfügung zu stellen (Kap. 2.2.3.3.). Von 1990 bis 1997 brachte man die noch besser ausgestatteten **Block II A** (*advanced*) Satelliten in ihre Umlaufbahnen. Sie sind mit gegenseitigen Kommunikationseinrichtungen ausgestattet und einige tragen Reflektoren für Laserdistanzmessungen. Die *Military Full Operational Capability* (FOC) von GPS ist offiziell am 17.07.1995 erklärt worden, als 24 Block II/II A Satelliten zur Verfügung standen (Bauer, 1997; 2003; 2011).

Die Nachfolger dieser Satelliten gehören den **Block II R** (*replenishment* oder *replacement*) an, die von Juli 1997 an gestartet wurden. Sie verfügen über die Eigenschaft, Strecken von Satellit zu Satellit messen zu können (*Satellite-to-Satellite Ranging*). Dies liefert zusätzliche Informationen zur Berechnung der Bahndaten. Außerdem lassen sich diese Berechnungen auch völlig unabhängig von Bodenstationen durchführen, was besonders aus militärischer Sicht von Bedeutung ist. Seit September 2005 wurden **Block II R-M** Satelliten gestartet, die neue zivile sowie militärische Codes zur Verfügung stellen (L2C auf L2 und der militärische *M-Code* auf L1 und L2).

Die nächste Entwicklung, die **Block II F** Satelliten (*follow on*), hatte nach einigen Verschiebungen bereits sehr große Verspätung, der erste Start erfolgte am 28.05.2010. Die großen Neuerungen hier-

bei sind ein drittes ziviles Signal mit höherer Leistung (*L5C* auf dem neuen Trägerband *L5*) und die Ausstattung der Satelliten mit *Inertialsystemen* (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Der Entwurf der *dritten Generation* von GPS-Satelliten hat bereits begonnen (**Block III A**), es sind jedoch vor 2017 keine Starts vorgesehen und angesichts technischer wie wirtschaftlicher Probleme wird sich dieses Programm noch weiter verzögern. Ein wesentliches Merkmal der nächsten Generation wird ein vierter ziviler Code auf *L1* sein (*L1C*), der den vorhandenen *C/A-Code* ergänzt und in Folge wahrscheinlich ablösen wird. Für die militärische Seite soll u.a. der *M-Code* regulierbar wesentlich stärker gesendet werden können, um eine höhere Resistenz gegenüber Interferenzen zu erreichen, und in Zukunft den *P-Code* ersetzen (GAO, 2009; Persson, 2009; Wikipedia, 2014j).

2.2.2. Systemaufbau

Das GPS wird, wie auch alle anderen GNSS, üblicherweise in drei Bereiche aufgeteilt (u.v. (Seeber, 1989; 1993; 2003)):

- Das **Raumsegment** mit den aktiven Satelliten.
- Das **Kontrollsegment** zur System- und Zeitkontrolle sowie zur Bahnüberwachung und -vorhersage.
- Das **Nutzersegment** mit unterschiedlichen Geräten für den Empfang.

2.2.2.1. Das Raumsegment

Es besteht bei GPS im Vollausbau aus *24 Satelliten*, deren **Bahnen** in sechs verschiedenen Ebenen (mit je vier Satelliten) liegen (Abb. 2–34.). Sie sind nahezu kreisförmig, haben gegenüber dem Äquator eine Inklination von 55° , ihre Höhe beträgt ca. *20.200 km* und für einen Umlauf benötigen die Satelliten *12^h* Sternzeit. D.h. jeder Satellit umrundet die Erde in etwa zweimal pro Tag. Das System ist so aufgebaut, dass von jedem Punkt der Erde zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten gleichzeitig beobachtet werden können (u.a. (Seeber, 1989; 1993)).

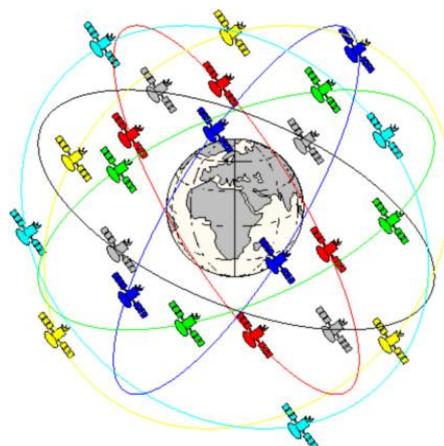
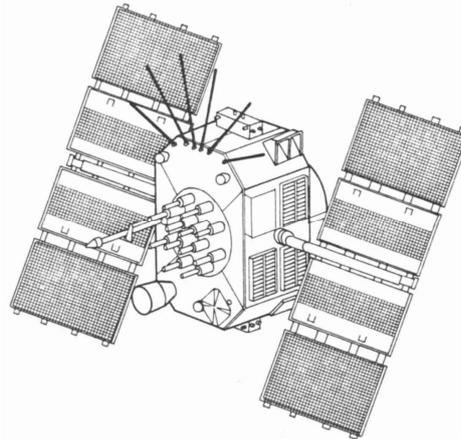


Abb. 2–34.: Satellitenkonstellation von GPS (Thomä, 1996)

Jeder **Satellit** enthält, vereinfacht zusammengefasst, einen Sender, einen Empfänger, mehrere Antennen, je nach Generation unterschiedliche Oszillatoren (die als Zeitgeber fungieren), Mikroprozessoren zur Steuerung der Satellitenfunktionen, zwei Sonnensegel zur Versorgung mit Solarenergie und ein Antriebssystem (*Abb. 2–35.* zeigt einen GPS-Satelliten aus der Anfangszeit der Entwicklung). Die Masse eines Satelliten beträgt etwa zwischen 800 und 2000 kg und seine geplante Funktionsdauer 4,5 - 15 Jahre (u.a. (*Seeber, 1989; 1993*)).



*Abb. 2–35.: Schematische Darstellung eines GPS-Satelliten
(Seeber, 1989)*

Die primäre Aufgabe eines Satelliten besteht im Senden von **Signalen**, die mit geeigneten Empfängern registriert werden können. Hochpräzise *Oszillatoren* (Rubidium- und Cäsiumatomuhren, Galileo verwendet auch Wasserstoff-Maser) dienen der Bereitstellung eines Frequenznormals. Bei GPS werden aus einer *Grundfrequenz* von 10,23 MHz durch Multiplikation *drei Trägerfrequenzen* im *L-Band* abgeleitet (*Formeln (2.1)*), (*Kahmen, 1997; 2006*).

$$L1 = 154 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1575,42 \text{ MHz} (\hat{=} 19,0 \text{ cm})$$

$$L2 = 120 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1227,60 \text{ MHz} (\hat{=} 24,4 \text{ cm})$$

$$L5 = 115 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1176,45 \text{ MHz} (\hat{=} 25,5 \text{ cm})$$

(2.1)

Jeder Satellit sendet die Trägerwellen *L1* und *L2* aus (ab jenen von Block IIF offiziell auch *L5*), denen Navigationssignale (*Codes*) und Navigations- sowie Systemdaten (*Navigationsnachricht*) überlagert sind. Die **Codes** sind den Trägerwellen als sogenannte PRN-Sequenzen (*Pseudo Random Noise*) aufmoduliert. Das *L1*-Signal enthält sowohl die genauen (militärischen) **P**- und **M**-Codes (*Precision* bzw. *Military*, letzterer ab den IIR-M), als auch den weniger genauen (zivilen) **C/A**-Code (*Coarse/Acquisition*). Auf dem *L2*-Signal befinden sich dieselben militärischen Codes wie auf *L1* und der neue zivile **L2C**-Code ab den IIR-M-Satelliten. Genauer betrachtet ist der *L2C* zusammengesetzt aus dem *L2CM* (*Moderate-Length*) und dem *L2CL* (*Long-Length*), wobei sich die Navigationsnachricht in ihrer neuen Form nur auf *L2CM* befindet.

Das zukünftige *L5*-Signal (ab den IIF) beinhaltet den zivilen **L5C**-Code, der sich aus dem *L5I* (*In-Phase*) und dem *L5Q* (*Quadrature-Phase*) zusammensetzt (*Hofmann-Wellenhof et al., 2008*). Vor allem wegen der Lage dieses Signalbandes, der höheren Abstrahlleistung und zusätzlichen speziellen Syn-

chronisationssequenzen auf beiden Codes wird dieses dritte zivile Signal für *Rettungsdienste* von hoher Bedeutung sein.

Alle diese *Ranging-Codes* stellen Zeitmarken dar und erlauben die Bestimmung des Zeitpunktes der jeweiligen Signalausendung. Schließlich ist auf jeder Trägerwelle noch eine **Navigationssnachricht** aufmoduliert. Aus dieser gewinnen die Empfangsgeräte unter anderem die *Bahndaten* der Satelliten (u.v. (Seeber, 1989; 1993)).

2.2.2.2. Das Kontrollsegment

Dieses hat primär folgende Aufgaben zu erfüllen (u.a. (Seeber, 1989; 1993)):

- Kontrolle der Satelliten
- Bestimmung der GPS-Systemzeit
- Vorausberechnung der Satellitenbahndaten und des Satellitenuhrenverhaltens
- Übertragen der Navigationsdaten in den Datenspeicher jedes Satelliten

Das **operationelle** (militärische) **Kontrollsegment** des GPS bestand vor den ersten wesentlichen Modernisierungen aus der *Hauptkontrollstation* in Colorado Springs (diese dient auch Monitorzwecken), drei *Monitorstationen* mit *Bodenantennen* in Kwajalein, Ascencion und Diego Garcia sowie einer weiteren *Monitorstation* auf Hawaii. Später folgte noch eine solche Station in Cape Canaveral (mit *Bodenantenne*). Alle Monitorstationen sind nach Längengraden ungefähr regelmäßig über den Globus verteilt (Abb. 2–36.). Weiters entstand eine *Hauptkontrollstation in Reserve* (in Gaithersburg, Maryland), die jedoch erst bei Ausfall von jener in Colorado aktiviert werden soll (Bauer, 2003).



Abb. 2–36.: Die ursprünglichen Stationen des GPS-Kontrollsegments (Seeber, 1989)

Im Zuge von **GPS-Modernisierungen** kamen bis 2005 *sechs neue Monitorstationen* zum Kontrollsegment hinzu. Diese liegen in Washington DC, Buenos Aires (Argentinien), Manama (Bahrain), Hermitage (Vereinigtes Königreich), Quito (Ecuador) und Adelaide (Australien). 2006 wurden weitere *fünf Monitorstationen* in Betrieb genommen, gelegen in Fairbanks (Alaska), Papeete (Tahiti), Pretoria (Südafrika), Osan (Südkorea) und Wellington (Neuseeland), (*Hofmann-Wellenhof et al., 2008*).

Eine **Monitorstation** besteht in erster Linie aus einem *Zwei- oder Mehrfrequenzempfänger*, der mit hochpräzisen *Frequenznormalen* (Atomuhren) ausgestattet ist, sowie Sensoren zur Sammlung meteorologischer Daten. Zu ihren Hauptaufgaben zählt, Entfernungsdaten zu den jeweils sichtbaren Satelliten aufzuzeichnen, sie bezüglich tropo- und ionosphärischer Refraktion zu korrigieren und das Messrauschen durch statistische Verfahren zu glätten.

Die **Hauptkontrollstation** ruft bei den Monitorstationen die gesammelten Daten ab, berechnet und extrapoliert daraus die Satellitenbahndaten (*Ephemeriden*) und das Verhalten der Satellitenuhren. Diese Daten werden zu einer Navigationsnachricht zusammengestellt und über Datenleitungen an die Bodenantennen weitergegeben (*Bauer, 2003*).

Die **Bodenantennen** übermitteln die Navigationsnachricht an die jeweils sichtbaren Satelliten. Diese werden mehrmals täglich mit neu gerechneten Daten versorgt. Bei eventuellen Störungen kann mit längerfristig vorausberechneten Ephemeriden, die in den Satelliten ständig abgespeichert sind, je nach Satellitentyp bis zu mehreren Monaten, jedoch mit steigenden Genauigkeitseinbußen, gearbeitet werden (*Hofmann-Wellenhof et al., 2008*).

Durch die globale Verteilung der Stationen können täglich mehrere Kontakte zwischen jedem Satelliten und dem Kontrollsegment vorgenommen werden, um die vorausberechneten Ephemeriden zu erneuern. Dies genügt den Anforderungen an ein *operationelles Ortungs- und Navigationssystem*, für viele Anwendungen auch auf geodätischer Ebene. In einigen speziellen Bereichen, wie z.B. der geodynamischen Forschung oder für großräumige Referenznetze, werden jedoch Bahndaten mit höherer Genauigkeit benötigt. Hierzu dienen umfassendere Netze von Beobachtungsstationen, großteils auf ziviler Basis. Als Beispiel sei angeführt das von der *International Association of Geodesy* (IAG) initiierte und seit 1994 betriebene *International GNSS Service* (*IGS, 2014*) mit mehr als 200 weltweit verteilten GPS-, GLONASS-, Compass / Beidou- und Galileo-Stationen.

2.2.2.3. Das Nutzersegment

Dieses umfasst verschieden ausgeprägte *Satellitenempfangsanlagen* und die dazugehörige *Steuerungs-* sowie *Auswertesoftware*. Ein professioneller GNSS-Empfänger besteht im Wesentlichen aus folgenden Hauptkomponenten (u.a. (*Seeber, 1989; 1993*)):

- Antenne mit Vorverstärker
- Hochfrequenzteil: für Signalidentifizierung und -verarbeitung
- Mikroprozessor: für Empfängerkontrolle, Datenerfassung und Navigationslösung
- Präzisionsoszillator
- Nutzerkommunikation: Bedienungs- und Anzeigefeld
- Datenspeicherung
- Stromversorgung

Entsprechend den verschiedenen Datentypen und Signalverarbeitungsstrategien lassen sich **GNSS-Empfänger** nach unterschiedlichen Gesichtspunkten in Gruppen einteilen (u.a. (Bauer, 1997; 2003; 2011)). Hierbei sei anzumerken, dass sich die Empfängertechnologie laufend hinsichtlich Größe, Gewicht, Bedienungs- und Auswertekomfort (und natürlich der Empfangssensibilität und Genauigkeit) weiterentwickelt. Für diese Arbeit ist eine *Differenzierung nach Anwendungskategorien* sinnvoll, weitere Betrachtungen für mobile Endgeräte beziehen sich auf Erstere:

- Navigationsempfänger
- Zeitempfänger
- Geodätische Empfänger

Die wesentlichen *Unterscheidungsmerkmale* für alle Empfänger betreffen die Anzahl der empfangbaren Frequenzen (Ein-, Zwei- oder Mehrfrequenzempfänger, zunehmend auch für GLONASS, Compass/Beidou sowie Galileo ausgelegt), die Möglichkeiten zur Signalauswertung (nur Code- oder auch Trägerphasenverarbeitung), die Anzahl der hardwaremäßig ausgeführten Kanäle je Frequenz und die Ausstattung mit Korrelatoren. Fällt Letztere besonders umfangreich aus, so spricht man auch von einem *High-Sensitive-Empfänger* (Kap. 3.3.6.).

Navigationsempfänger müssen mindestens die zivilen Codes der L1-Signale (C/A bei GPS) von vier Satelliten gleichzeitig auswerten und in Echtzeit die Position berechnen und anzeigen bzw. ausgeben können (Bauer, 1997). Die Leistungsfähigkeit moderner Navigationsempfänger geht heute jedoch schon weit über die Funktion „Positionsermittlung“ hinaus, wobei die grundlegende GPS-Empfangstechnologie bereits hochintegriert auf sehr kleinen Chips mit geringem Strombedarf Platz findet. Zunehmend werden GNSS-Empfangs- und Auswertefunktionen auch in Kombinationschipsätzen (zusammen mit GSM, UMTS, LTE(-A), WLAN, Bluetooth etc.) ermöglicht.

Ein **Zeitempfänger** ist von der Hardware einem Navigationsempfänger sehr ähnlich. Er verfügt darüber hinaus über spezielle Möglichkeiten zur Zeit- und Frequenzausgabe. Von einem **geodätischen Empfänger** spricht man, wenn neben den Code- auch die Trägerphasen gemessen und zur Positionsbestimmung verwendet werden können. Solche Geräte verfügen heute bis zu mehreren hundert Kanälen und verarbeiten, bei entsprechender Ausstattung, auch GLONASS-, Compass- und Galileo-Signale für eine Positionsbestimmung.

Hauptaufgabe eines GNSS-Empfängers ist das Erfassen und Verarbeiten der Satellitensignale. Dazu nimmt die Antenne alle Signale jener Satelliten auf, die sich über dem Horizont befinden und zu denen freie Sichtverbindung besteht. Der Empfänger identifiziert die Signale, bestimmt von welchem Satelliten sie kommen und ordnet sie einzelnen Empfangskanälen zu (Bauer, 1997).

Zielsetzung dieser **Kanäle** ist es, über Phasenvergleichsverfahren *Pseudoentfernungen* zu den einzelnen Satelliten zu bestimmen. Dafür wird bzw. werden eines oder mehrere der in *Tab. 2–6.* angeführten Signale benutzt (*Kahmen, 1997; 2006*). Da die Träger und Codes verschiedene Wellen- bzw. Zykluslängen haben, lassen sich die Pseudoentfernungen mit unterschiedlicher Genauigkeit messen. Setzt man voraus, dass bei den Phasen- bzw. Codevergleichsmessungen eine Wellen- bzw. Zykluslänge im Verhältnis 1:100 bis 1:1000 und präziser aufgelöst werden kann, so ergibt sich eine Genauigkeit bei der Pseudoentfernung zwischen *0,2 mm* und *3 m*.

	Band / Code	Frequenz / Übertragungsrate	Wellen- / Zykluslänge	Genauigkeit der Pseudoentfernung
Träger	L1	1575,420 MHz	19,05 cm	0,2 – 2,5 mm
	L2	1227,600 MHz	24,45 cm	0,2 – 2,5 mm
	L5	1176,450 MHz	25,50 cm	0,2 – 2,5 mm
Codes	P	10,230 MHz	29,31 m	0,03 – 0,3 m
	C/A	1,023 MHz	293,10 m	0,3 – 3,0 m

Tab. 2–6.: Träger und Codes bei den GPS-Frequenzen (Kahmen, 2006)

Als zusätzliche Aufgabe haben die Kanäle noch das Datensignal zu detektieren und die daraus gewonnene *Navigationsnachricht* an den Prozessor weiterzugeben. Ein hochentwickelter Korrelations-Empfangskanal liefert somit folgende Ausgaben (u.a. (*Seeber, 1989; 1993*)):

- Codephasen
- Trägerphasen
- Änderung der Trägerphasen (Dopplerfrequenz)
- Navigationsnachricht

Der **Prozessor** berechnet schließlich aus der Navigationsnachricht die Positionen der Satelliten und weiters mit Hilfe der Pseudoentfernungen den *Ort der Empfangsantenne*, beides im *Referenzsystem WGS 84* bzw. *ITRS (Kap. 4.1.1.)*. Darüber hinaus kann die *Zeit*, die *Geschwindigkeit* und der *Kurs* angegeben werden (u.a. (*Bauer, 1997*)).

2.2.3. Messverfahren und Fehlereinflüsse

2.2.3.1. Beobachtungsprinzip und Methodik

Bei der Positionsbestimmung mittels GNSS handelt es sich um ein **Einweg-Entfernungsmessverfahren**. Wesentliche Beobachtungsgröße ist die *Laufzeit* eines Signals von der Satelliten- zur Empfangsantenne. Diese Signallaufzeit wird über die Ausbreitungsgeschwindigkeit in eine Entfernung umgewandelt. Bei einem Einwegverfahren werden Uhrablesungen im Sender mit jenen im Empfänger verglichen. Im Allgemeinen kann nicht vorausgesetzt werden, dass beide Uhren streng synchronisiert sind. Die gemessenen Laufzeiten enthalten folglich einen systematischen Synchronisationsfehler und

die hieraus errechneten Entfernungen werden deshalb *Pseudoentfernungen (Pseudoranges)* genannt (u.v. (Seeber, 1989; 1993)).

Das grundlegende Beobachtungsprinzip von GPS und aller anderen GNSS besteht also in der Bestimmung von Pseudoentfernungen. Es sind im einfachsten Fall gleichzeitige Messungen zu (mindestens) vier Satelliten erforderlich, um daraus eindeutig *Lage* und *Höhe* (drei Koordinaten) des Empfängers (Neupunktes) und den *Uhrensynchronisationsfehler* ableiten zu können.

Abb. 2–37. zeigt die *geometrische Situation* mit vier sichtbaren Satelliten. Die bekannten Satellitenörterter S^j ermöglichen zusammen mit den gemessenen Pseudoentfernungen r_i^j die Berechnung der Koordinaten des Neupunktes N_i im Satellitenreferenzsystem (x, y, z) . Mathematisch ergeben bereits drei Satelliten mit den entsprechenden Entfernungen, die im Raum Kugeln mit dem Satelliten im Zentrum repräsentieren, eine eindeutige, wenn auch nicht überbestimmte und somit unkontrollierte, Lösung¹⁹. Eine vierte Messung (Pseudodistanz) dient der Bestimmung des Uhrensynchronisationsfehlers.

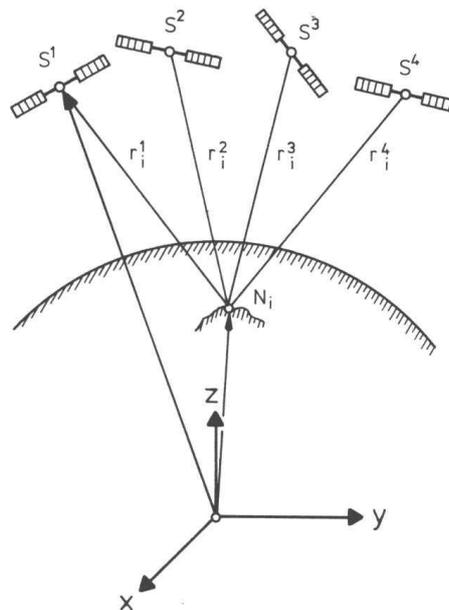


Abb. 2–37.: Geometrie bei der Positionsbestimmung mit GNSS
(Kahmen, 1997)

In der Praxis werden meist fünf und mehr Satelliten mit guter Konstellation verwendet, besonders bei hochgenauen geodätischen und geodynamischen Anwendungen, und alle unbekannt Parameter in einer gemeinsamen Ausgleichsrechnung bestimmt. Andererseits genügen bei bekannter (näherungsweise) Geländehöhe auch drei Satelliten, um eine Lagebestimmung durchzuführen, was besonders im dichtverbauten innerstädtischen Gebiet mit schwierigen Abschattungsbedingungen oft der Fall ist (Kap. 4.3.).

¹⁹ Geometrisch bringt der Schnitt dreier Kugeln im Raum i.A. zwei Lösungen hervor, von denen jedoch die richtige meist durch bekannte Näherungswerte des gesuchten Ortes und / oder seiner Geländehöhe gefunden werden kann.

Grundsätzlich kann man zur **Bestimmung der Signallaufzeiten** zwischen zwei Messmethoden unterscheiden (u.a. (Kahmen, 1997; 2006)):

- Codephasenmessung
- Trägerphasenmessung

Bei der *Codephasenmessung* benötigt der Empfänger einen Code gleichen Musters als Referenz, den er mit Hilfe seiner Empfängeruhr erzeugt. Diese Referenzcodesequenz wird nun solange schrittweise phasenverschoben und mit dem von einem Satelliten empfangenen Codesignal korreliert, bis ein Maximum auftritt. Dies geschieht z.B. mit einer Kreuzkorrelationsfunktion beider Signale. Die hierbei notwendige Phasenverschiebung ist ein Maß für die Laufzeit.

Die *Trägerphasenmessung* verwendet bei den Phasenvergleichsverfahren anstatt eines Codes unmittelbar den Träger. Da die Wellenlänge der Träger kleiner ist als die der Codes (Tab. 2–6.), erzielt man eine mehr als hundertfach höhere Auflösung der Distanzmessung. Deshalb wird dieses Verfahren primär in geodätischen Empfängern angewendet. Die gemessene Phasendifferenz ist hier jedoch als Stück der Wellenlänge nur ein sehr kleiner Bruchteil der Pseudoentfernung zwischen Satellit und Empfänger. Das Hauptproblem besteht somit in der Bestimmung der unbekanntenen Anzahl der verbleibenden vollen Wellenlängen, häufig auch als *Ambiguity* bezeichnet. Dies geschieht u.a. durch geeignete Messstrategien oder durch Kenntnis von genauen Näherungswerten der gesuchten Position und besonderen statistischen Auswerteverfahren (Kahmen, 1997).

Spezielle **Punktbestimmungsverfahren** und **Messmethoden** (statische und kinematische wie: *Static*, *Rapid Static*, *Real Time Kinematik* (RTK) etc.) seien hier nicht näher erläutert, da sie hauptsächlich in der Geodäsie und Geodynamik und weniger in der einfachen Ortsbestimmung und Navigation eingesetzt werden. Die Methoden unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Abstand der zu bestimmenden Punkte, die Messdauer, die geforderte Mindestanzahl sichtbarer Satelliten, den maximal zulässigen DOP-Faktor, die Anzahl der Messfrequenzen, die Art der Phasenmessung und die unterschiedliche Behandlung von Echtzeit- und Postprocessing-Verfahren.

Messmethode	Basislänge	Messdauer je Punkt	Genauigkeit Lage (1σ) (Höhe = Lage \times 2)
Static (Trägerphasen / 2 Frequenzen)	10 – 40 km	1 – 24 h, ≥ 4 Satelliten	1,5 – 5 mm + 0,01 – 1 ppm
Rapid Static (Trägerphasen / 2 Frequenzen)	< 5 km	5 – 8 min, ≥ 5 Sat., GDOP ≤ 6	5 – 20 mm + 1 ppm
	< 15 km	8 – 20 min, ≥ 5 Sat., GDOP ≤ 6	5 – 20 mm + 1 ppm
RTK (D-GPS) (Trägerphasen / 2 Frequenzen)	< 10 km	wenige Sek. nach Initialisierung	5 – 20 mm + 1 – 2 ppm
RTK (D-GPS) (C/A-Code- / Trägerphasen)	< 10 km	in der Bewegung	0,1 – 0,3 m
RTK (D-GPS) (Codephasen)	< 100 km		1 – 5 m

Tab. 2–7.: Beispiele von Messmethoden mit GPS (Kahmen, 1997)

Um eine Vorstellung von den erzielbaren Genauigkeiten zu bekommen, sei auf *Tab. 2–7.* verwiesen. Die letzte Angabe in dieser Tabelle entspricht bereits einem Genauigkeitsbereich, der auch mit mobilen D-GPS-Empfängern (*Kap. 2.2.4.*) oder A-GPS-Methoden in Mobilfunknetzen (*Kap. 3.3.6.* und *Kap. 5.2.*) unter guten Bedingungen erreichbar ist.

2.2.3.2. Fehlerbehandlung

Die *Genauigkeit der Positionsbestimmung* mit GNSS hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab (u.v. (*Bauer, 1997; 2003; 2011*)):

- Der Genauigkeit der Pseudostreckenmessungen.
- Der geometrischen Konfiguration aus dem Empfänger und der beobachteten Satelliten.

Der **Gesamtfehler einer Pseudostrecke** setzt sich aus einer Vielzahl verschiedener Fehleranteile zusammen, die folgenden drei Hauptgruppen zugeordnet werden können:

- Satellitenfehler
- Signalausbreitungsfehler
- Empfängerfehler

Segment	Fehlerquelle	GPS mit SA (1σ) [m]	GPS ohne SA (1σ) [m]
Raumsegment	Satellitenuhr	3,0	3,0
	Satellitenbahnstörungen	1,0	1,0
	Selective Availability (SA)	32,3	0,0
	andere Störungen	0,5	0,5
Kontrollsegment	Ephemeriden, Prädiktionsfehler	4,2	4,2
	andere Störungen	0,9	0,9
Nutzersegment	Ionosphäre	5,0	5,0
	Troposphäre	1,5	1,5
	Empfängerrauschen	1,5	1,5
	Mehrwegeausbreitung	2,5	2,5
	andere Störungen	0,5	0,5
Gesamt (UERE , 1σ)		33,3	8,0

Tab. 2–8.: Fehlereinflüsse bei der Pseudostreckenmessung mit GPS (Kahmen, 1997)

Die einzelnen Fehlerquellen werden i.A. in ihrer Auswirkung auf die Entfernungsbestimmung betrachtet. Dazu projiziert man die jeweiligen Fehlerbeiträge auf die Verbindungslinie Empfänger – Satellit und ihre fehlertheoretische Summe ergibt den *User Equivalent Range Error (UERE)*. Einen systematischen Überblick der wesentlichsten Fehlereinflüsse (*Gesamtfehlerhaushalt*) auf eine Pseudodistanz bei der C/A-Code-Messung zeigt *Tab. 2–8.* (*Kahmen, 1997*). Die zitierten Werte reprä-

sentieren den Technologiestand Ende der 90er-Jahre. Durch sukzessive Weiterentwicklung kann heute unter bestmöglichen Bedingungen von einem *UERE* zu 3-5 m ausgegangen werden (*Kap. 6.1.*).

Für die Erläuterung der einzelnen Fehlerquellen sei auf einschlägige Fachliteratur verwiesen (u.v. (*Seeber, 1993; Bauer, 2003*)). Herausgegriffen werden soll aber die **Mehrwegeausbreitung** (Multi-path) im Vergleich mit jener im Mobilfunk (*Kap. 2.1.4.2.*). In Mobilfunknetzen, egal ob GSM, UMTS oder LTE(-A), ist Mehrwegeausbreitung nicht vermeidbar und im städtischen Bereich durchaus erwünscht, da sonst eine flächendeckende Versorgung und ein Betrieb in Gebäuden nicht möglich wären.

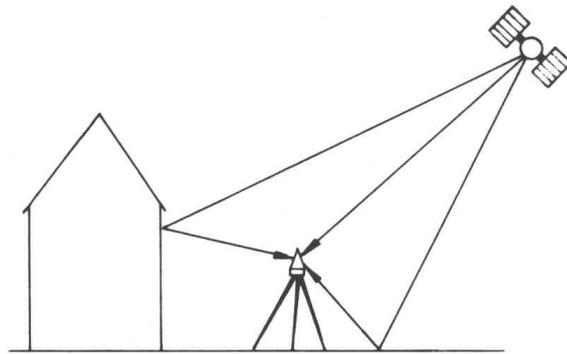


Abb. 2–38.: Mehrwegeausbreitung beim Satellitenempfang (*Seeber, 1989*)

Bei GPS-Messungen im genauen und hochgenauen Bereich der Geodäsie stellt die Mehrwegeausbreitung eine unangenehme Fehlerquelle dar, die schwer vorhersehbar ist und jedenfalls vermieden bzw. korrigiert werden muss. Moderne Antennen und Empfänger sind diesbezüglich schon weiterentwickelt und können reflektierte Signale meist abschirmen oder herausfiltern, was aber nicht garantiert werden kann (*Abb. 2–38.*). In der *Ortsbestimmung und Navigation* mit einfachen Code-Empfängern und einer Genauigkeitserwartung bestenfalls im Meterbereich kann Mehrwegeausbreitung hingegen wieder zu einem Nutzen werden. Durch spezielle Antennen, Verstärkungstechniken und eine hohe Anzahl von Korrelatoren können sogar sehr schwache Satellitensignale verarbeitet werden und dies auch innerhalb von Gebäuden (*Tab. 5–4., Kap. 3.3.6.*). Damit steigt die Gesamtanzahl beobachtbarer Satelliten, was die Zuverlässigkeit einer Ortsbestimmung erhöht oder diese überhaupt erst ermöglicht.

Der Zusammenhang zwischen der **Standardabweichung** der *Pseudostreckenmessung* (σ_l) und jener der *Positionsbestimmung* (σ_p) wird durch eine mit **DOP** (*Dilution of Precision*) bezeichnete skalare Größe beschrieben (u.v. (*Bauer, 1997; 2003; 2011*)):

$$\sigma_p = DOP \cdot \sigma_l \tag{2.2}$$

Es sind verschiedene DOP-Bezeichnungen in Gebrauch:

- PDOP*: Position DOP (Längen-, Breiten- und Höhenbestimmung)
- HDOP*: Horizontal DOP (Längen- und Breitenbestimmung)
- VDOP*: Vertical DOP (Höhenbestimmung)
- TDOP*: Time DOP (Zeitbestimmung)
- GDOP*: Geometrical DOP (Positions- und Zeitbestimmung)

Es lässt sich zeigen, dass die Größe des **PDOP** als reziproker Wert des Volumens V eines Tetraeders gedeutet werden kann (bei 4 Satelliten), das aus den Spitzen der normierten Vektoren zwischen Empfänger- und Satellitenpositionen gebildet wird²⁰ (Abb. 2–39.):

$$PDOP = \frac{1}{V} \tag{2.3}$$

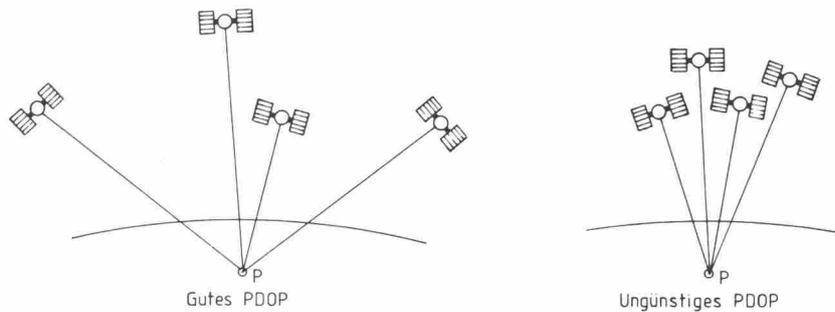


Abb. 2–39.: Satellitengeometrie und PDOP (Seeber, 1989)

Zu demselben Ergebnis gelangt man nach den Regeln der *Ausgleichsrechnung* und *Fehlerfortpflanzung* bei überbestimmter Ermittlung der Position mit Codemessungen. Aus der *Kovarianzmatrix* lässt sich Folgendes ableiten (Formeln (2.4), (2.5), (2.6), (Seeber, 1989)):

$$\sigma_l^2 \cdot [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} = \sigma_l^2 \cdot \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xz} & q_{xt} \\ q_{yx} & q_{yy} & q_{yz} & q_{yt} \\ q_{zx} & q_{zy} & q_{zz} & q_{zt} \\ q_{tx} & q_{ty} & q_{tz} & q_{tt} \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$$\sigma_P = \sigma_l \cdot \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz}} = \sigma_l \cdot PDOP$$

$$\sigma_H = \sigma_l \cdot \sqrt{q_{xx} + q_{yy}} = \sigma_l \cdot HDOP$$

$$\sigma_V = \sigma_l \cdot \sqrt{q_{zz}} = \sigma_l \cdot VDOP$$

$$\sigma_T = \sigma_l \cdot \sqrt{q_{tt}} = \sigma_l \cdot TDOP$$

(2.5)

²⁰ Die Spitzen dieser normierten Vektoren stellen somit die Ecken eines i.A. unregelmäßigen schiefen Tetraeders dar.

$$\sigma_G = \sigma_l \cdot \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz} + q_{tt}} = \sigma_l \cdot GDOP = \sigma_l \cdot \sqrt{\text{Spur}[\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1}} \quad (2.6)$$

Der DOP-Faktor ist also ein Maß für die Güte der Konfiguration jener geometrischen Figur, die sich aus der Empfänger- und den Satellitenpositionen ergibt. Zusammen mit *Tab. 2–8.* lässt sich nun nach *Formel (2.2)* eine **Fehlerabschätzung** für die Positionsbestimmung mittels einem einfachen C/A-Code Navigationsempfänger angeben, wobei mit $PDOP = 3$ durchschnittliche geometrische Bedingungen angenommen werden:

$$\sigma_p = 3 \cdot 8 (3 \cdot 33,3) = 24 (100) \text{ m} \quad (2.7)$$

Die Werte in Klammern beziehen sich auf die Angaben mit aktivierter Selective Availability, wobei dieser Fehlereinfluss dann deutlich überwiegt. Eine detaillierte Darstellung von Messungen samt Fehlerdiskussion mit zwei Handgeräten, die dieser Empfängerklasse entsprechen, ist in *Kap. 4.3.* beschrieben und in *Anhang I – Visualisierungen* bezüglich ihrer Fehlersituationen dokumentiert.

2.2.3.3. Selective Availability und Anti-Spoofing

GPS ist durch seine Entwicklungsgeschichte in erster Linie als ein Navigationssystem der Streitkräfte für Flotten- und Truppenbewegungen sowie zur Raketensteuerung in Echtzeit entstanden und gewachsen (*Kap. 2.2.1.*). Dies bedeutet, dass allein die Regierung der USA darüber befindet, ob und in welchem Umfang GPS allgemein zugänglich ist und in Zukunft sein wird. Es ist demnach auch, vom Genauigkeitspotential her betrachtet, in zwei unterschiedlichen Kategorien bereitgestellt worden, dem *Standard Positioning Service (SPS)* und dem *Precise Positioning Service (PPS)*, (*Kap. 2.2.*). Der allgemeine Zugang zum PPS wurde durch Anwendung von *Selective Availability (SA)* und *Anti-Spoofing (AS)* eingeschränkt, der zum SPS nur durch SA in der Genauigkeit beeinträchtigt (u.v. (*Bauer, 1997; 2003; 2011*)).

Bei der **Selective Availability**, die von 1990 bis 2000 aktiv war, aber theoretisch jederzeit wieder (inzwischen auch lokal begrenzt) eingeschaltet werden kann, handelt es sich um eine künstliche Verschlechterung der Satellitenbahndaten sowie der Satellitensignale. Die SA gliedert sich in zwei Komponenten. Der ε -Prozess erzeugt eine kontrollierte Verschlechterung der in den Navigationsdaten gesendeten Bahnparameter der Satelliten. Der δ -Prozess verursacht programmgesteuert ein Verändern der Grundfrequenz der Satelliten, was sich auf alle Signale und damit auch auf alle Beobachtungsgrößen auswirkt (*Kahmen, 1997*). Durch die SA ist die USA in der Lage, die für nicht autorisierte Nutzer erreichbare absolute Genauigkeit der Positionsbestimmung stufenlos zu regeln.

Unter **Anti-Spoofing**, das von 1994 an aktiv ist, versteht man die Verschlüsselung des *P-Codes*. Hierbei wird dieser durch Überlagerung mit einem geheimen *W-Code* in einen sogenannten *P(Y)-Code* umgewandelt, der direkt nur autorisierten GPS-Nutzern zugänglich ist (*Bauer, 2003*). AS ist eine Maßnahme, die verhindern soll, dass die von Störsendern ausgestrahlten und gefälschten Signale von den eigenen Empfängern als Satellitensignale aufgefasst werden, was folglich zu einer falschen Ortung bzw. Fehlleitung von Flugkörpern führen würde.

Die *Abschaltung der SA* erfolgte am 2. Mai 2000, 4:00 UTC, nachdem bereits im Frühjahr 1996 vom Präsidenten der USA angekündigt wurde, dass dies je nach sicherheitspolitischen Gegebenheiten sowie technischen und wirtschaftlichen Belangen in den nächsten 10 Jahren geschehen würde. Als Gründe für die dann doch relativ frühe Deaktivierung lassen sich anführen:

- Technisch ist es bereits möglich GPS-Signale nur lokal zu verschlechtern, um in Krisengebieten die „militärische Sicherheit“ zu gewährleisten.
- Der Markt für zivile GPS-Anwendungen wächst stetig.
- GPS spielt eine immer größere Rolle bei den *erweiterten mobilen Notrufdiensten* (wie E-911, E-112 bzw. eCall und E-119, *Kap. 3.1.2.* und *Kap. 3.1.4.*).
- Entsprechende Konkurrenz aus Europa durch das damals gerade geplante Galileo.



SA Transition -- 2 May 2000

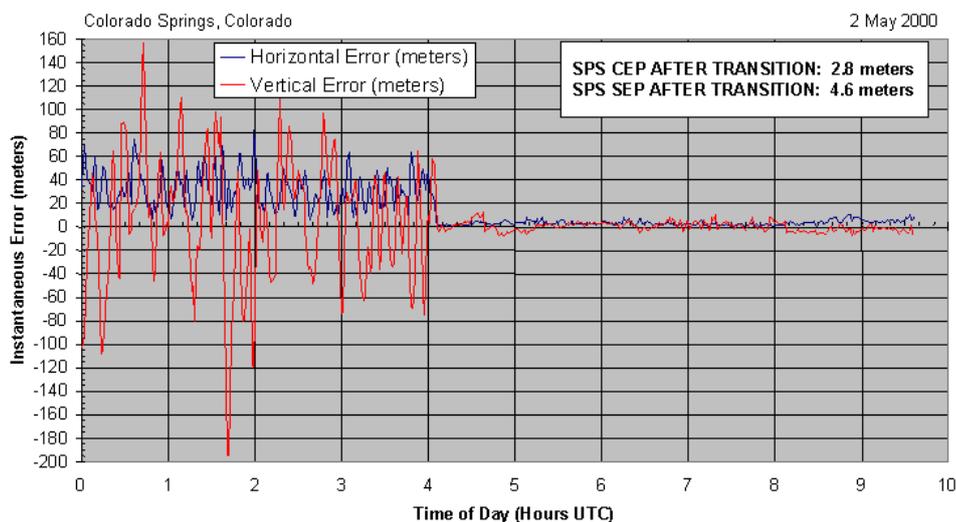


Abb. 2–40.: Steigerung der Genauigkeit durch Abschaltung der SA (IGEB, 2004)

Abb. 2–40. soll einen Eindruck vermitteln, in welcher Größenordnung der *Genauigkeitsgewinn durch die Abschaltung der SA* liegt. Bei den Fehlerangaben aus Colorado Springs (Hauptkontrollstation) sei zu beachten, dass es sich hier um Navigationslösungen (C/A-Code) handelt, gemessen mit einem Trimble SV6 Empfänger. Die 2D- bzw. 3D-Fehlerangaben *CEP* (2,8 m) bzw. *SEP* (4,6 m) entsprechen einer Wahrscheinlichkeit von 50% (*Kap. 4.2.*). Umgerechnet nach *Formel (6.1)* aus *Kap. 6.* ergibt das im 2D-Fall 3,5 m bei 67% und 5,8 m bei 95%²¹.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die SA-Abschaltung bei einfachen C/A-Code-Empfängern eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 5–10, je nach örtlicher Situation, Alter und Ausstattung des eingesetzten Gerätes, bewirkte.

²¹ Es ist davon auszugehen, dass diese durchaus sehr genauen Werte mit kalibrierten Spezialantennen und ohne Störungen durch Mehrwegeausbreitung ermittelt wurden. Mit welchen Ephemeriden die Berechnungen erfolgten und ob dabei auch gewisse Filter eingesetzt wurden, ist den Angaben nicht zu entnehmen.

2.2.4. Differentielles GPS

Im letzten Kapitel wurde aufgezeigt, dass mit einem zivilen GPS-Navigationsempfänger eine absolute Positionsbestimmung (3D) in Echtzeit mit einer Genauigkeit von ca. 24 m bei 67% seit Abschaltung der *Selective Availability* unter durchschnittlichen Bedingungen möglich ist (Formel (2.7)). Dies ist für viele Anwendungen im Bereich der **Location Based Services** (Kap. 3.2.2.) schon ausreichend, aber für einige Aufgaben, z.B. in der Fahrzeug- und Fußgängernavigation oder bei Sicherheits- und Notrufdiensten, mitunter noch zu ungenau. Eine weitere Steigerung der Genauigkeit kann mit Methoden des *differentiellen GPS* (**D-GPS**, bei mehreren Systemen auch mit D-GNSS bezeichnet) erreicht werden. Diese finden meist auch bei der Ortsbestimmung mittels **A-GPS** (bzw. A-GNSS) in Mobilfunknetzen ihre Anwendung (Kap. 3.3.6.).

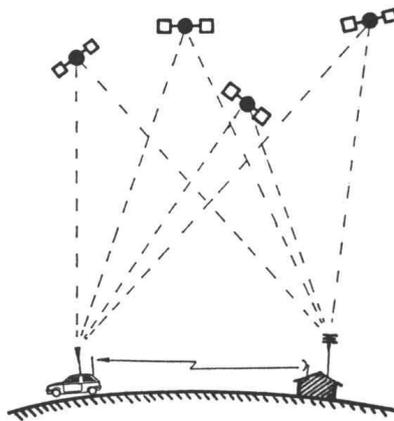


Abb. 2–41.: Prinzip der Positionsbestimmung mit D-GPS
(Kahmen, 1997)

Die **Grundidee von D-GPS** beruht darauf, dass GPS-Beobachtungsdifferenzen von benachbarten Empfängern weitestgehend frei sind von vielfältigen Fehlereinflüssen, die bei Einzelmessungen mit gleichem Vorzeichen und Betrag auftreten. Diese Fehler betreffen vor allem die *Atmosphäre*, die *Ephemeriden*, die *Satellitenuhren* und ehemals die *SA*. Das Prinzip von D-GPS besteht in seiner einfachsten Form nun darin, die Position einer Station, deren Koordinaten exakt bekannt sind (auch *Referenz-* oder *Basisstation* genannt), aus den aktuellen Messdaten eines GPS-Empfängers hoher Genauigkeit neu zu bestimmen und aus der Differenz zwischen den vorhandenen und den neu bestimmten Koordinaten *Korrekturwerte* zu ermitteln (u.a. (Bauer, 1997; 2003; 2011)). Diese werden dem mobilen GPS-Nutzer (*Rover*) übermittelt, damit er seine eigenen GPS-Messungen korrigieren und somit die Genauigkeit wesentlich verbessern kann (Abb. 2–41.).

Bezüglich des **Korrekturverfahrens** gibt es mehrere Methoden, die sich hinsichtlich ihres Aufwandes bei der Datenübertragung, der erzielbaren Genauigkeit und der Flexibilität unterscheiden (u.a. (Bauer, 2003)):

- D-GPS mit *Korrekturdaten*
- D-GPS mit *Originalmessdaten* (Rohdaten)

Bei **D-GPS mit Korrekturdaten** werden aus Messungen auf der Referenzstation Korrekturwerte ermittelt, die der Rover bei der Berechnung seiner eigenen Position berücksichtigt. Dabei gibt es wiederum zwei Möglichkeiten:

- Positionskorrektur
- Messwertkorrektur

Bei der **Positionskorrektur** errechnet der Referenzempfänger aus den gemessenen Pseudoentfernungen seine Position und vergleicht diese mit der bekannten Sollposition. Daraus ergeben sich *Koordinatendifferenzen*, die an den mobilen Rover übermittelt werden. Dieser korrigiert damit seine selbst ermittelte Position. Der Nachteil dieses recht einfach zu realisierenden Verfahrens liegt darin, dass die Referenz- und Roverstation dieselben Satelliten verwendet haben müssen, denn die berechnete Korrektur ist nur für die jeweils beobachtete Satellitenkonstellation gültig.

Die **Messwertkorrektur** bedient sich der Übertragung von *Pseudostreckenkorrekturen*. Dabei werden auf der Referenzstation die gemessenen Entfernungen mit den errechneten Sollentfernungen zu allen sichtbaren Satelliten verglichen. Die sich daraus ergebenden Differenzen und die voraussichtlichen Änderungsraten dieser Größen werden an den mobilen Rover übermittelt. Dieser kann sich für die Verbesserung der Berechnung seiner eigenen Position die entsprechenden Werte auswählen.

Das Verfahren der Messwertkorrektur ist gerätetechnisch und hinsichtlich der Software aufwendiger als das Verfahren der Positionskorrektur. Auch müssen mehr Daten von der Referenz- an die Roverstation übertragen werden. Dafür ist dieses Verfahren erheblich flexibler und auch genauer, womit es in der Praxis zum *Standardverfahren des D-GPS* bei der Auswertung von Pseudostrecken wurde.

Bei **D-GPS mit Rohdaten** werden die *Originalmessdaten* der Referenzstation an die Roverstation zur weiteren Verarbeitung übertragen. Dort erfolgt, gemeinsam mit den eigenen Messungen, die Berechnung der entsprechenden Koordinaten. Das Verfahren hat gegenüber dem mit Korrekturdaten den Vorteil, dass auf der Referenzstation keine Rechenarbeiten anfallen und der Rover keine Detailinformationen über die Algorithmen zur Berechnung der Korrekturwerte haben muss.

Bei der Betrachtung der **Genauigkeiten von D-GPS in Echtzeit** gilt es mehrere Gesichtspunkte zu beachten. Grundsätzlich gelten Korrekturwerte streng nur für den Zeitpunkt und die Position sowie deren unmittelbare Umgebung, zu dem bzw. an der die Messungen durchgeführt werden. Die Berechnung der Korrekturwerte und deren Übermittlung an mobile Rover benötigt jedoch eine gewisse Zeit, womit sie bei ihrer Verwendung bereits ein entsprechendes Alter erreicht haben. D.h. die erreichbare Genauigkeit hängt neben dem angewandten Verfahren auch von folgenden Faktoren ab (*Bauer, 2003*):

- Entfernung zwischen Referenzstation und Nutzer
- Datenübertragungsrate
- Aufdatierungsrate

Den Einfluss der letzten beiden Parameter kann man dadurch verkleinern, indem neben den Korrekturwerten selbst Informationen darüber bereitgestellt werden, wie sich diese Werte ändern. Da sich

die Hauptfehlereinflüsse von GPS nicht sprunghaft ändern, besteht die Möglichkeit, die Korrekturen über gewisse Zeiträume als lineare Funktion der Zeit zu modellieren.

Tab. 2–9. und Tab. 2–10. geben Auskunft über die Fehlereinflüsse auf Pseudoentfernungen bei der C/A-Code-Messung und Anwendung von D-GPS sowie die Abhängigkeit der Fehler von der Distanz zwischen Referenzstation und Rover. Hierbei sind nur die in der zweiten Tabelle nochmals angeführten Werte entfernungsabhängig bzw. bleiben bestehen, die übrigen werden durch die Methode D-GPS eliminiert.

Segment	Fehlerquelle	GPS mit SA (1σ) [m]	D-GPS (1σ) [m]
Raumsegment	Satellitenuhr	3,0	0,0
	Satellitenbahnstörungen	1,0	0,0
	Selective Availability	32,3	0,0
	andere Störungen	0,5	0,0
Kontrollsegment	Ephemeriden, Prädiktionsfehler	4,2	0,0
	andere Störungen	0,9	0,0
Nutzersegment	Ionosphäre	5,0	0,0
	Troposphäre	1,5	0,0
	Empfängerrauschen	1,5 (0,7)	2,1 (1,0)
	Mehrwegeausbreitung	2,5	2,5
	andere Störungen	0,5	0,5
Gesamt (UERE , 1σ)		33,3	3,3

Tab. 2–9.: Vergleich der Fehlereinflüsse bei GPS und D-GPS
(Thomä, 1996; Kahmen, 1997)

Fehlerquelle	Entfernung zur Referenzstation [km]			
	0	200	1000	2000
Ephemeriden	0,0	0,1	0,5	1,0
Ionosphäre	0,0	1,4	3,1	4,3
Troposphäre	0,0	1,8	1,8	1,8
Empfängerrauschen	1,0	1,0	1,0	1,0
Mehrwegeausbreitung	0,0 (2,5)	0,0 (2,5)	0,0 (2,5)	0,0 (2,5)
Gesamt (UERE , 1σ)	1,0 (2,7)	2,5 (3,5)	3,8 (4,5)	4,9 (5,5)

Tab. 2–10.: Entfernungsabhängige Genauigkeit von D-GPS
(Thomä, 1996; Kahmen, 1997)

Zusammenfassend lässt sich nun für die *Genauigkeit von D-GPS mit Codemessungen* Folgendes festhalten. Mehrwegeausbreitung ist eine Fehlerquelle des Nutzersegments, die durchaus vermeidbar ist und auch in der Literatur nicht immer standardmäßig zum Gesamtfehlerhaushalt einer Pseudostreckenmessung gezählt wird. Darum sind in der zweiten Tabelle jeweils zwei Werte für den Gesamtfehler angegeben. Bei genaueren Empfängern ist auch von einem wesentlich geringeren Rauschen

auszugehen (Werte in Klammern in erster Tabelle). Somit ergeben sich für die absolute Positionsbestimmung in Echtzeit bei einem $PDOP < 3$ und im Nahbereich der Referenzstation folgende Werte (Bauer, 1997; 2003):

- Genauigkeit bei Positionskorrekturen:

C/A-Code: $5 - 15\ m$

P-Code: $3 - 5\ m$

- Genauigkeit bei Messwertkorrekturen:

C/A-Code: $1 - 3\ m$

P-Code: $0,5 - 1\ m$

3. Ortsbestimmung und Location Based Services

Dieses Kapitel gibt einen Überblick zum Bereich **Location Based Services** (LBS) sowie eine einführende Terminologie und Kurzbeschreibung zu den **Ortsbestimmungsmethoden**, die die Grundvoraussetzung dieser Dienste bilden. Des Weiteren werden **Genauigkeitsvorschläge** und **gesetzliche Vorschriften** hinsichtlich der Ortung für bestimmte Bereiche von Diensten aus der Literatur bzw. von Behördenseite gebracht.

Die folgenden Betrachtungen dieser Arbeit beziehen sich vordergründig auf *Ortsbestimmungsmethoden und Dienste*, die mit *mobilen Endgeräten* der Kategorie „Handy“, „Smartphone“, „Tablet“, „Notebook“ u.ä. in *zellularen Netzen* wie GSM, UMTS und LTE(-A) betrieben werden können. Von besonderem Interesse für die *Ortsbestimmung* sind vor allem jene Methoden, die sich in ihrer Entwicklung der letzten Jahre am „praxistauglichsten“ herausgestellt haben und in Zukunft eine wesentliche Rolle spielen werden. Bei den *Diensten* bilden jene einen Schwerpunkt, die von der rechtlichen Seite eine treibende Kraft darstellen. Dies sind insbesondere die **Notrufdienste** (wie z.B. E-911 (USA), E-119 (Japan), E-112 und eCall (Europa)), da sie einen erhöhten Genauigkeitsanspruch an die Standortbestimmung stellen und somit technisch wie wirtschaftlich mehr Voraussetzungen fordern (*Haselgrübler, 2000; 2002; Staudinger und Haselgrübler, 2002*).

3.1. Warum Ortsbestimmung?

Historisch betrachtet hatte die Motivation für eine Ortsbestimmung in zellularen Mobilfunknetzen verschiedene Ausgangspunkte. In den **USA** wurden durch die *Federal Communications Commission* (FCC) behördenseitig **gesetzliche Vorschriften** erlassen, die besagen, dass Mobilfunkanbieter die Rufnummer und den Standort eines Mobilgerätes, von dem aus ein Notruf über 911 abgegeben wird, an eine bestimmte Zentrale weiterleiten müssen (*Kap. 3.1.2*). D.h. der *Aspekt der Sicherheit*, der für viele Amerikaner ein Hauptgrund für den Erwerb eines Mobilfunkgerätes darstellt, stand hier im Vordergrund.

In **Europa** sind es bis jetzt vor allem **wirtschaftliche Überlegungen**, die eine Ortsbestimmung in Mobilfunknetzen interessant macht. Die Vorgaben für eine Ortung bei Abgabe eines Notrufes über E-112 beschränken sich auf sehr oberflächlich formulierte Aussagen wie „bestmöglich“ oder „dem Stand der Technik entsprechend“ (*Kap. 3.1.3*). Ursprünglich bewogen durch eine große Ernüchterung am Ende der WAP-Euphorie sowie Versteigerungen von UMTS-Lizenzen zu oft stark überhöhten Preisen, versuchten alle Mobilfunkanbieter Kapital gut zu machen mittels unterschiedlicher *mobiler Dienste*, von denen ein beträchtlicher Teil eine *Ortsinformation* mit verschiedener Genauigkeit voraussetzt (*Kap. 3.1.5*).

Diese **ortsabhängigen Dienste** (LBS) werden jedoch nur zögerlich angenommen, da mitunter große Bedenken bezüglich des *Datenschutzes* bestehen und die gewünschten Informationen über andere Quellen oft schneller, kostengünstiger oder besser aufbereitet bezogen werden können. Darüber hinaus ist das *Angebot an möglichen Ortsbestimmungsmethoden* in den Netzen der EU-Länder bis dato fast ausschließlich auf die *Cell-ID* beschränkt (*Kap. 3.3.2.*). Mobilgeräte mit integrierten Satellitenempfängern kommen nur sehr langsam auf den Markt und sind i.d.R. dem oberen Preissegment zuzuordnen. Während in den USA Handys ohne GPS-Fähigkeit bereits gänzlich aus dem Handel verschwinden, schätzt man in Europa den Anteil der mit Satellitenortung ausgestatteten Geräte auf ca. 20% (Stand 2009, (*Brimicombe und Li, 2009*)).

In **Japan** muss das dort „*Keitai*“ genannte Mobilgerät, welches standardmäßig internetfähig ist und via *i-mode* auf Dienste zugreifen kann, ab April 2007 eine *Ortsbestimmung mittels Satelliten* (A-GPS, QZSS u.a., *Kap. 3.3.6.*) ermöglichen. Die Vorschrift dient dazu, um bei einem **Notruf** (z.B. E-119 für die Feuerwehr) eine eindeutige Position übermitteln zu können (*Tsujino, 2005; Petrova und Wang, 2008*).

3.1.1. Next Generation Networks und Ortsbestimmung

Ortsbestimmung mit Mobilfunkgeräten in **zellularen Netzen** hat eine zunehmende Vielzahl an Beweggründen aus rechtlicher, technischer und wirtschaftlicher Sicht. Diese Möglichkeiten der Ortung stellen jedoch nur einen Sonderfall einer viel größeren Anzahl von Systemen zur Ortsbestimmung in unterschiedlichsten Situationen dar, wie sie u.a. in (*Rappaport et al., 1996; Hightower und Borriello, 2001; Retscher und Kealy, 2005; Liu et al., 2007; Gu et al., 2009; König, 2009; Huang und Gartner, 2010*) vorgestellt werden. Als Beispiele seien genannt das System RADAR aus der Microsoft-Forschung (beruhend auf WLAN) zur Ortung und Verfolgung von Personen in Gebäuden (*Bahl et al., 2000; Zhao et al., 2011*) und das Projekt NAVIO²² zur Fußgängernavigation inner- und außerhalb von Gebäuden (u.a. (*Gartner et al., 2004; Retscher und Thienelt, 2004*)).

Zellulare Mobilfunknetze, die gemäß ITU der 4. Generation (*Kap. 2.1.2.4.*) zuzurechnen sein werden, firmieren auch unter dem Überbegriff *Next Generation Mobile Network* (NGMN) und sind somit der mobile Teil eines *Next Generation Network* (NGN), bisweilen auch als „*New Generation Network*“ bezeichnet. Eine Definition bzw. engere Absteckung eines NGN ist schwierig, da es dazu in der Forschung sehr unterschiedliche Auslegungen gibt und darin enthaltene Architekturen, Funktionen und Protokolle erst am Beginn einer länger dauernden Entwicklung stehen. Es lässt sich jedoch heute schon festhalten, dass das *Internetprotokoll* (IPv6) dabei eine zentrale Rolle spielen wird (*All-IP-Netze*), sowie *Anwendungen und Dienste* (VoIP, VoLTE, IP-TV, Video-on-Demand, LBS, uvm.) wesentlich in den Vordergrund rücken werden (*NGMN, 2014; Schnabel, 2014s; r*).

Ortsbestimmung in NG-Netzen ist nicht auf mobile Clients beschränkt, so wie wir sie heute kennen (z.B. Navi im Auto, Smartphone mit Stadtplan). Betrachtet man ein NGN in erweitertem Kontext als Konvolut bestehend aus verschiedenen Knoten und deren Verbindungen untereinander, so kann man zu den *Knoten* z.B. auch Dinge aus dem Transportbereich (Fahrzeuge, Züge, Flugzeuge, Schiffe,

²² NAVIO war ein forschungsgruppenübergreifendes Projekt, durchgeführt an der Technischen Universität Wien (Kartographie, Geoinformation und Ingenieurgeodäsie).

Container, etc.), Bestandteile von Verkehrsleitsystemen (Ampeln, Verkehrsschilder, Leuchttürme, etc.), Maschinen, Anlagen, Haushaltsgeräte und jeden einzelnen Menschen selbst dazu zählen. Die *Verbindungen* zwischen diesen Knoten erfolgen entweder mittels *fixen Leitungen* oder werden per *Funk* hergestellt. Haben bei den fix verdrahteten Verbindungen lange Zeit (qualitativ sehr unterschiedliche) *Kupferkabel* dominiert, so ist heute der Übergang zu *Lichtwellenleitern* (Glas-, Quarz- oder Kunststofffasern) klar erkennbar (*Schnabel, 2014q*).

Als Beispiel sei hier die **Breitbandverbindungstechnik VDSL2** (*Very High Speed Digital Subscriber Line*) gebracht, die als Nachfolger von ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), genauer gesagt von ADSL2+, in ihrer Infrastruktur ein *Hybridnetz* aus Glasfaser- und Kupferkabel bildet, welches sehr hohe symmetrische Übertragungsraten ermöglicht (angegeben werden meist *50-100 MBit/s* brutto). Das Netz selbst besteht nur mehr aus Lichtwellenleitern, die Zugänge zu den einzelnen Haus- bzw. Kundenanschlüssen (auch „*letzte Meile*“ genannt) erfolgen jedoch noch über Kupferleitungen (*Schnabel, 2014b*).

Dieses System wird auch als „*Fiber to the Curb*“ (**FTTC**) bezeichnet, was soviel bedeutet wie „Glasfaser bis zum Bordstein bzw. Straßenrand“. Da dort meist ein grauer Kasten steht, in dem sich ein Anschlussverteiler befindet, steht FTTC auch für „*Fiber to the Cabinet*“. Die Gesamtqualität einer VDSL2-Verbindung ist also hauptsächlich von der Länge und Qualität der verbliebenen Kupferleitung abhängig, die sich zwischen *100 m* und *1,5 km* bewegt. In Zukunft wird jedoch die Glasfaser direkt bis zum nächsten Anschluss (Knoten) geführt werden. Diese Technik trägt die Bezeichnung „*Fiber to the Home*“ (**FTTH**) und lässt noch wesentlich höhere Bandbreiten zu, die bereits in den Bereich der 10 GB-Netze gelangen (*Schnabel, 2014g; w*).

Bei den **Funkverbindungen** zwischen den Knoten eines NG-Netzes ist zu unterscheiden zwischen **übergeordneten Netzen**, vorwiegend repräsentiert durch *zellulare Mobilfunknetze*, seltener durch *Satellitennetze* wie *Iridium* oder *Thuraya* (*Schnabel, 2014a; p; Thuraya, 2014*) oder *Breitbandvernetzungen* wie *WiMAX*²³ nach IEEE 802.16 d/e bzw. *WiMAX 2* nach IEEE 802.16 m (*WiMAX-Forum, 2009*), und unterschiedlichen **kleineren Subnetzen**. Diese sind hauptsächlich aufgebaut als *WLAN* in den Ausprägungen IEEE 802.11 b/a/g/n/ac und zukünftig „/ad“ oder als *Automotive WLAN* zur Car-to-Car bzw. Car-to-X Vernetzung (*Siemens, 2009; Schnabel, 2014m*).

Funkverbindungen im Nah- und Kurzbereich sind von großer Vielfalt geprägt und es gibt eine ganze Reihe von Entwicklungen, wobei heute noch nicht ganz absehbar ist, welche davon sich dauerhaft durchsetzen werden. *Bluetooth* (IEEE 802.15.1) und *UWB* (Ultra Wide Band, 802.15.3 a) sind die bekannteren beiden, *ZigBee* (IEEE 802.15.4) und die proprietären Techniken *EnOcean* und *Z-Wave* hingegen weniger verbreitet. Nicht unerwähnt bleiben sollen Funkanwendungen mit *NFC* (Near Field Communication), z.B. für mobile Zahlungsvorgänge, und *RFID* (Radio Frequency Identification), z.B. eingesetzt in der Logistik, (*Schnabel, 2014f; y*).

Sowohl in den groß- als auch kleinräumigen Netzen ist eine **Positionsbestimmung** möglich und notwendig, um die *Lage der Knoten* in einem lokalen, regionalen oder globalen Koordinatensystem (*Kap. 4.1.*) zu ermitteln und damit z.B. die nötigen Informationen für *ortsabhängige Dienste* generieren zu können. *Funkverbindungen* können dabei mittels bestimmter Techniken zur Positionsermittlung selbst verwendet werden (*Kap. 3.3.*) oder sie dienen zur Übermittlung von Messwerten, -ergebnissen sowie unterstützender Daten, die eine Ortsbestimmung verbessern, mitunter auch erst ermög-

²³ Die Abkürzung steht für: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

lichen. Als Beispiel sei hier die Methode *Assisted-GNSS* erwähnt (Kap. 3.3.6.), die in gewissen Situationen, z.B. in dichten Wäldern oder innerhalb von Gebäuden, auf diese Weise wesentlich öfters zu Ergebnissen gelangen kann (Su, 2007).

Bei vielen **lagefesten Knoten**, wie z.B. Mobilfunksender, Antennen von WLAN-Hot-Spots, Bluetooth-, NFC- oder RFID-Tags an bestimmten Landmarken (Sehenswürdigkeiten, Kartenautomaten, Zu- und Durchgangskontrollen uvm.), Kästen von Kabelverzweigungsstellen, Ampeln oder Wegweisern, ist die Position im Netzwerk bekannt und kann abgefragt werden bzw. wird dies in Zukunft möglich sein. Die **beweglichen Knoten** müssen ihre Lage stets neu bestimmen, wobei sie ihr Netz selbst benutzen, auf übergeordnete Netze zurückgreifen oder Sensoren von globalen Satellitenortungs- bzw. -navigationssystemen (GNSS) einsetzen.

Als Beispiele für bewegliche Knoten lassen sich die klassischen Mobilfunk- und Navigationsgeräte oder auch die von der EU vorgegebene *eCall-Box* für Kraftfahrzeuge (Kap. 3.1.4.) anführen. Weiters bekannt sind verschiedenartige Boxen für den Diebstahlschutz von Fahrzeugen oder Containern, „Fußfessel“-Systeme im Strafvollzug oder kleine mobile Notrufgeräte aus dem Gesundheitsbereich (Herz-Kreislauf-, Alzheimerpatienten u.a.), (Zagami et al., 1998).

Man erkennt, dass es von wesentlicher Bedeutung ist, bei gewissen Diensten gut über die **Genauigkeit der Position** der involvierten *festen*, aber vor allem der *beweglichen Knoten* bescheid zu wissen. Wird z.B. in Europa ein *Notruf über E-112* abgesetzt (Kap. 3.1.3.), so möchte ein Hilfesuchender, der nicht mehr in der Lage ist, sich verbal zu verständigen, mit der gleichen Verlässlichkeit gefunden werden, egal ob er sich z.B. am Wiener Stephansplatz oder auf einem kartographisch nicht erfassten Forstweg mitten in einem abgelegenen Waldstück ohne Mobilfunkverbindung befindet. Noch problematischer wird es, wenn sich ein Hilfesuchender innerhalb eines Gebäudes befindet, in einer Tiefgarage oder einem längeren Tunnel mit mehreren Abzweigungen. Weitere *Sonderfälle* bilden Systeme, die in sich abgeschlossen sind, über eigene Netzwerke verfügen und sich mit höherer Geschwindigkeit relativ zur Erdoberfläche bewegen, wie z.B. Reisezüge, Flugzeuge oder Kreuzfahrtschiffe.

In diesen Fällen spielen die *Positionsinformationen von Knoten aus verschiedenen Netzen* zusammen, die jedoch mitunter eine stark unterschiedliche Qualität aufweisen. Große Schiffe z.B. können mit einer Satellitenverbindung wie Inmarsat, Iridium oder Globalstar auf das Internet zugreifen, die Position mit einem GNSS bestimmen und intern mit WLAN, Bluetooth, einem RFID-System oder auch Femtozellen für zellularen Mobilfunk vernetzt sein. Würde man hier z.B. mitten im Pazifik von einem tiefer liegenden Deck mit einem normalen Mobilfunkgerät eine internationale Notrufnummer kontaktieren wollen, so müsste eine ganze Reihe von Netzen, Ortsbestimmungsmethoden und Schnittstellen zusammenspielen, um Hilfe von außen rasch zur Verfügung zu haben (wo befindet sich das Schiff im Pazifik?, auf welchem Deck und in welcher Kabine bzw. welchem Bereich der Notrufende?, fortgesetzte Positionsdatenübermittlung etc.).

Obige Beispiele zeigen, dass es bei der Diskussion über die *Ortung von mobilen Geräten* und den dazugehörigen *Genauigkeitsüberlegungen* immer wichtig ist zu sehen, welche *Netze* involviert sind. Weiters von Bedeutung ist das Wissen um das dahinter stehende *Szenario* und die eingesetzten *Methodiken* und *anerkannten Standards*, die angewendet werden, um zu entsprechenden Zahlenwerten zu kommen.

3.1.2. Vorgaben zum mobilen Notruf in den USA

Bereits seit dem Jahre 1996 werden in den USA durch die FCC Regeln vorgegeben, wie von den Mobilfunkanbietern ein über die *Nummer 911* abgegebener **Notruf** zu behandeln ist. Ausgangspunkt dieser Überlegungen waren Befragungen und Studien, die ergaben, dass eine Vielzahl von Personen in Notsituationen, verletzungs- oder schockbedingt bzw. in einer fremden Umgebung, nicht in der Lage war, ihre Nummer und noch weniger ihren genauen Standort bekanntzugeben. Aus diesen Gründen wurde vorgeschrieben, dass jeder Notruf über 911 an eine dezidierte Einsatzzentrale weiterzuleiten ist (*Public Safety Answering Point, PSAP*), egal in welchem Mobilfunknetz sich der Anrufer gerade befindet und ob er mit dem jeweiligen Anbieter einen Vertrag hat oder nicht (*Rappaport et al., 1996; Reed et al., 1998*).

Darüber hinaus schreibt die **Phase I** der erweiterten Notfalldienste (*Enhanced Emergency Services, E-911*) vor, ab 1. April 1998 sowohl die **Rufnummer des Anrufers** als auch den **Standort der Basisstation**, über die der Notruf im Mobilnetz durchgeführt wurde, an den nächsten PSAP weiterzuleiten. Ersteres, auch *Automatic Number Identification (ANI)* genannt, dient für etwaige Rückrufe, sollte die Verbindung unterbrochen werden, aber auch zur Identifizierung des Anrufers über den Namen, der mit der Nummer in Verbindung steht (*FCC, 2001b*). Der Standort der betroffenen Basisstation (*Kap. 3.3.2.*) gibt eine ungefähre Information über die Lage des Anrufers und hilft bei Entscheidungen, an welchen PSAP ein Notruf geleitet werden soll bzw. welche die nächstgelegenen Einsatzfahrzeuge sind, die informiert werden können.

Phase II der erweiterten Notfalldienste E-911 umfasst alle Vorschriften, die unter dem Begriff *Automatic Location Information (ALI)* zusammengefasst sind. Ursprünglich sollte es ab dem 1. Oktober 2001 möglich sein, Mobilfunkgeräte, die einen Notruf per 911 abgeben, automatisch und wesentlich genauer zu orten als über den Standort der Basisstation, in die das Gerät gerade eingebucht ist (*Kap. 3.3.2.*). Dazu wurde 1996 anfänglich verlangt, dass Mobilgeräte mit einer **Genauigkeit** von **125 m** in „67% aller Fälle“ zu orten sind (*FCC, 2001a*).

Statistisch betrachtet bedeutet dies, dass sich der wahre Aufenthaltsort des Gerätes mit einer Wahrscheinlichkeit von 67% in einem Kreis mit Radius von 125 m um den angegebenen Standort befindet. Aus Sicht der **Fehlermaße** und für die praktische Berechnung wurde diesbezüglich der **Distance Root Mean Square (dRMS)** herangezogen, in der Geodäsie auch bekannt als der *Helmert'scher Punktlagefehler* (*Kap. 4.2.2.*).

Ortungstechnik	67 % (der Notrufe)	95 % (der Notrufe)	5 % (restliche Notrufe)
Handset-Based	50 m	150 m	Versuch einer Standortbestimmung ist verpflichtend, sowie Weiterleitung einer Abschätzung an den PSAP
Network-Based	100 m	300 m	

Tab. 3–1.: Geforderte Genauigkeiten bei der Ortung von Mobilfunkgeräten für E-911 (*FCC, 1999*)

Nach dreijähriger Entwicklungszeit und dem Entstehen neuerer Ortsbestimmungsmethoden änderte die FCC ihre ersten Forderungen von 1996 hinsichtlich der **Genauigkeit der Ortung** von Mobilfunkgeräten. Einerseits ersetzte sie das strenge Genauigkeitsmaß **dRMS** durch einen empirischen *Circular Error Probable (CEP, Kap. 4.2.2.)*, andererseits wurde der Genauigkeitswert von einheit-

lich 125 m ersetzt durch *mehrere unterschiedliche Werte*, je nach Technik der Ortsbestimmung (Kap. 3.3.) und Wahrscheinlichkeit (Tab. 3–1.).

Auswirkungen aufgrund der Verwendung verschiedener Genauigkeitsmaße, insbesondere der Unterschied zwischen strengen und empirischen Maßen, sowie die Behandlung jener *Ortungen*, die zu *keinem Ergebnis führen* („Ausfallrate“), werden anhand umfangreichen Zahlenmaterials in Kap. 4.3.3. erläutert. Die FCC gibt diesbezüglich nur vor, dass eine „*Schätzung des Standortes*“ jedenfalls zu erfolgen hat und an den entsprechenden PSAP zu übermitteln ist.

Wegen schwerwiegender technischer und organisatorischer Probleme bei der Einführung von E-911, z.B. sehr ausführlich analysiert in (Hatfield, 2002), sowie enormen Kosten, wurden von den Mobilfunkanbietern, als alleinig Verantwortliche für die Umsetzung der Forderungen seitens der FCC, rechtliche Schritte gesetzt, um dem engen Zeitplan entgegenzutreten. Darauf folgend konnte mit der Behörde eine Einigung durch **Verlängerung des Einführungszeitplanes** erzielt werden, mit dem die Anbieter erst bis Ende 2005 sicherstellen mussten, dass ihre Mobilfunkkunden mit 95 % der im Umlauf befindlichen Geräte den Notruf E-911 nach Phase II nutzen können (Wilde et al., 2004; Brimicombe und Li, 2009).

Auch nach Ablauf dieser Frist stellte sich heraus, dass die *Genauigkeitsforderungen* der FCC an die Standortbestimmung für E-911 flächendeckend noch nicht annähernd erreicht waren. Dies lag einerseits an der Heterogenität der Bedingungen für Mobilfunknetze und Notrufannahmestellen (z.B. Unterschiede zwischen ländlichen Gebieten mit wenig Bevölkerung und städtischen Siedlungen) verbunden mit unterschiedlichen rechtlichen Vorgaben (PSAP werden auf Staats- bzw. County-Ebene reguliert). Andererseits aber auch an den Kosten für die Aufrüstung der Netze und PSAP, welche je nach Staat bzw. County verschieden bestritten wurden und werden (teilweise sogar über Steuern). Große Probleme stellen mitunter auch *technische Rahmenbedingungen* bei der Kommunikation zwischen den Mobilfunksystemen, ausgerüstet mit entsprechenden Ortsbestimmungsmethoden, und der Infrastruktur der PSAP dar, die die angebotenen Positionsinformationen nicht entgegennehmen können (Williams, 2005).

Datum / Zeitraum	Forderungen
11. Sept. 2007	Report and Order FCC 07-166 wird veröffentlicht
bis 11. Sept. 2008	Genauigkeitsvorgaben sind zu erreichen innerhalb: <ul style="list-style-type: none"> • jeder <i>Economic Area (EA)</i>, in der ein Mobilfunkanbieter seine Dienste anbietet
bis 11. Sept. 2010	<ul style="list-style-type: none"> • jeder <i>Metropolitan Statistical Area (MSA)</i> und <i>Rural Service Area (RSA)</i> • mindestens 75 % aller <i>PSAP Service Area</i>, die vom Anbieter versorgt werden • jeder <i>PSAP Service Area</i>, jedoch nur mit 50 % der geforderten Genauigkeit (z.B. anstatt 50 m bei 67 % werden nur 75 m verlangt usw.)
bis 11. Sept. 2012	<ul style="list-style-type: none"> • jeder <i>PSAP Service Area</i>, die vom Anbieter versorgt wird (i.A. gilt dies nur bei jenen PSAP, die Standortdaten nach Phase II entgegen nehmen können)

Tab. 3–2.: *Erweiterte Genauigkeitsanforderungen zur Ortung für E-911 (FCC, 2007a; b)*

Aus diesen Gründen entschloss sich die FCC in einem neuen **Report and Order** vom 11. September 2007 (FCC, 2007a; b) ihre Genauigkeitsvorgaben für E-911 nach Phase II von jedem Versorgungsbereich eines PSAP einzeln zu fordern (*PSAP Service Area geographic level*). Dies musste in

einem Zeitraum von fünf Jahren, jedoch mit entsprechenden Zwischenzielen, umgesetzt werden (Tab. 3–2.).

Diese **erweiterten Forderungen der FCC** an die Standortbestimmung stellten einen ersten Schritt dar in der **Konkretisierung der Angaben**, wie sie ursprünglich 1996 gemacht wurden, und zwar auf welche Weise diese Genauigkeiten zu bestimmen sind (abgesehen vom Fehlermaß). In der Frist bis Ende 2005 bestand nur die Pflicht, dass mit 95 % aller Mobilfunkgeräte bei 67 % bzw. 95 % der *Notrufe über E-911* die jeweiligen Genauigkeitsvorgaben einzuhalten sind. Diese Vorschriften bezogen sich, mangels näherer Erläuterungen oder Bestimmungen, auf das *gesamte Versorgungsgebiet* eines Anbieters. Der R&O vom 11. Sept. 2007 machte eine mit der Zeit fortschreitende geographische Granulierung der Fläche geltend, innerhalb derer die Genauigkeitsvorgaben zu erreichen waren, ohne jedoch auf die topologische Beschaffenheit der jeweiligen Fläche oder die Bevölkerungsdichte einzugehen ((Abb. 3–1.) mit Stand 2000).

Bei insgesamt 6184 PSAP in den USA (mit Ende 2009) gibt es welche, die ausschließlich städtisches Gebiet versorgen, und solche, die sich am Land oder in bergiger Umgebung befinden. Diese Unterschiede, die für die Ortsbestimmung jedoch von wesentlicher Bedeutung sind, werden in den Vorgaben bislang genauso wenig bedacht, wie eine Differenzierung nach Anrufen innerhalb oder außerhalb von Gebäuden oder nach sonstigen Unterschieden in den örtlichen Umgebungssituationen.

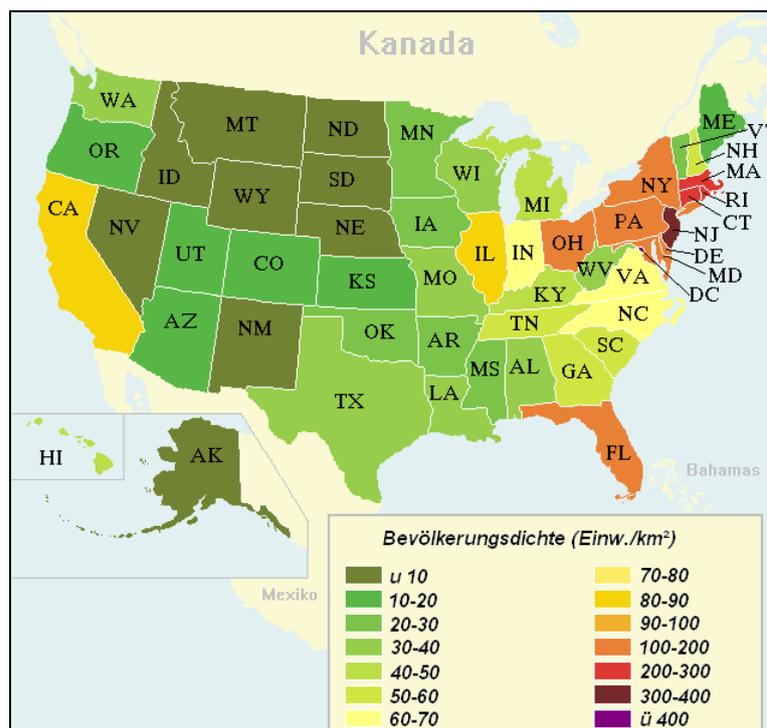


Abb. 3–1.: Bevölkerungsdichte der USA nach Bundesstaaten (Wikipedia, 2010c)

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass in den USA bis zum 11. Sept. 2012 die geforderten Genauigkeiten für die Standortbestimmung zu E-911 (Tab. 3–1.) durchschnittlich in jedem Versorgungsbereich eines PSAP gewährleistet sein mussten. Aktuell gibt es 3135 Counties mit einer durchschnittlichen Fläche von 1615 km² (Stand Ende 2009), Bevölkerung von etwa 100.000 (Stand des Jahres 2000) und insgesamt 6184 PSAP (NENA, 2010). Somit sind im Schnitt ca. 819 km² Ein-

satzgebiet und **50.700 Einwohner** für **einen PSAP** zu verwalten (*Abb. 3–2.*). Ergänzend sei jedoch erwähnt, dass es hiervon grobe Abweichungen geben kann. Z.B. besteht die Stadt *New York City* zwar aus *fünf Counties*, kommt aber in Summe auf eine Einwohnerzahl von ca. *8.275.000* (Stand 2007, (*Wikipedia, 2010b*)).

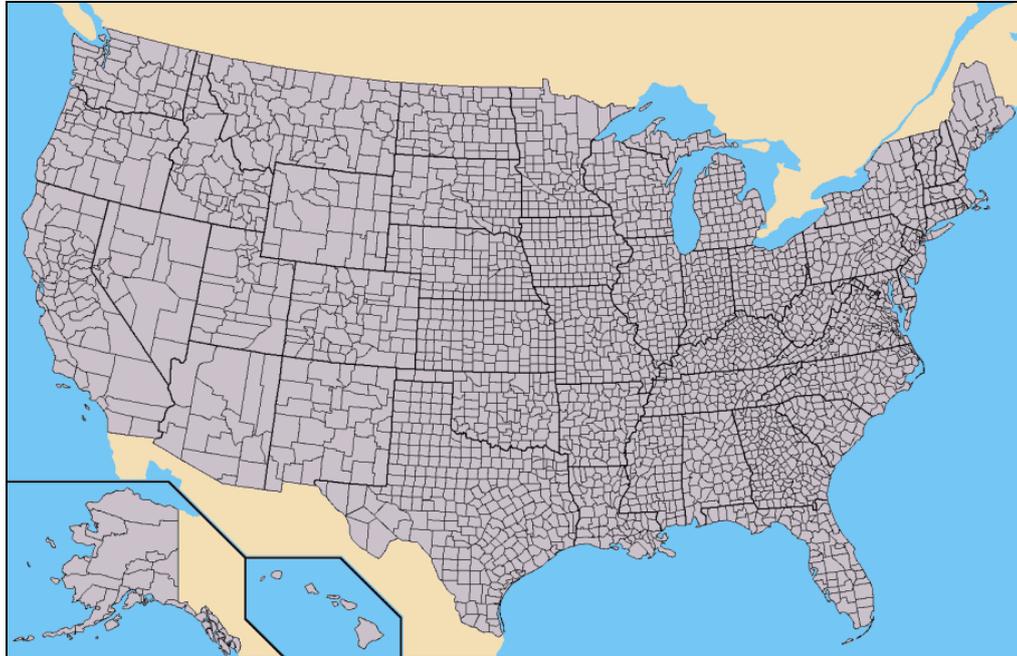


Abb. 3–2.: County-Grenzen der USA (Wikipedia, 2010a)

3.1.3. Der einheitliche und mobile Notruf in der EU

Der **einheitliche europäische Notruf** mit der Nummer **112** (auch *Euronotruf* genannt) kann bereits auf eine ca. 20-jährige Geschichte zurückblicken. Als letzter, neu hinzugekommener, EU-Staat hat Bulgarien die landesweite Einführung jedoch erst Ende September 2008 abgeschlossen (*EENA, 2009*). Regelungen für einen einheitlichen Notruf bestehen in einigen europäischen Ländern jedoch schon wesentlich länger²⁴. Was die **Standortbestimmung** für den mobilen Notruf (**E-112**) betrifft, sind die Vorgaben viel allgemeiner und unpräziser formuliert worden als in den USA, und von vielen betroffenen Parteien werden weitere Änderungen erwartet bzw. gefordert. Aus diesen Gründen sei hier detaillierter auf die Entstehung und diverse Schwierigkeiten eingegangen.

²⁴ Eine starke Initiative zu einem bundesweit einheitlichen Notruf gab es in Deutschland. Damals noch in der BRD war es *Björn Steiger*, der, nach dem Verlust seines Sohnes durch einen tragischen Unfall mit lang verzögerten Rettungsmaßnahmen, 1973 einheitliche Nummern durchsetzen konnte (110 und 112). Die aus seinem großen Engagement entstandene *Björn Steiger Stiftung* leistet bis heute sehr wertvolle Dienste im deutschen Rettungswesen (*Björn-Steiger-Stiftung, 2014*). Sie setzt sich vehement für eine rasche, genaue und automatische Standortbestimmung beim mobilen Notruf ein und bietet hierfür auch besondere Dienste an.

Den Ausgang der Entwicklung bildete die *Entscheidung des EU-Rates* vom 29. Juli 1991 zur **Einführung einer einheitlichen europäischen Notrufnummer (91/396/EWG)**. Darin werden als Beweggründe u.a. folgende Argumente gebracht (*Europäischer-Rat, 1991*):

- Notdienste aller Art können am besten über das Telefon erreicht werden. In den einzelnen Mitgliedstaaten sind bislang jedoch verschiedene Notrufnummern in Gebrauch.
- Diese Unterschiede stellen Bürger, die in anderen Mitgliedstaaten mit Notsituationen konfrontiert sind, bei der Kontaktaufnahme mit den verantwortlichen Diensten vielfach vor Probleme.
- Die erhebliche Zunahme von Privat- und Geschäftsreisen in der Gemeinschaft verstärkt den Bedarf nach einer einheitlichen Notrufnummer deutlich.
- Die Einführung neuer Technologien in den öffentlichen Fernsprechnetzen inklusive fortgeschrittener Infrastrukturen bietet eine gute Möglichkeit zur Umsetzung einer einheitlichen europäischen, gegebenenfalls parallel zu bereits vorhandenen nationalen, Notrufnummer.
- Auch im Hinblick auf die Entwicklung eines gemeinschaftlichen Katastrophenschutzes ist die Zweckmäßigkeit eines einheitlichen Notrufs gegeben.

Die **Entscheidung des Rates** umfasst hiernach in Kurzform folgende Vorgaben, die an alle Mitgliedstaaten der EU gerichtet sind:

- Die Staaten tragen dafür Sorge, dass die **Nummer 112** als *einheitliche europäische Notrufnummer* in die öffentlichen Fernsprechnetze sowie in künftige dienstintegrierende digitale Netze und öffentliche Mobilfunknetze aufgenommen wird.
- Diese einheitliche Nummer wird gegebenenfalls parallel zu anderen vorhandenen nationalen Notrufnummern eingeführt (*Art. 1*).
- Als Zeitrahmen für die Einführung wird Ende Dezember 1992 bzw. in begründeten Ausnahmefällen Ende Dezember 1996 angegeben (*Art. 2 und 3*).
- Die Staaten treffen die erforderlichen Maßnahmen, um sicherzustellen, dass Anrufe bei der einheitlichen Notrufnummer in geeigneter Weise beantwortet und weitergeleitet werden, wie es der nationalen Organisation von Notdiensten im Rahmen der technischen Möglichkeiten der Netze am besten entspricht (*Art. 4*).

Der Weg führt weiter über die „*Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates* vom 7. März 2002 über einen gemeinsamen Rechtsrahmen für elektronische Kommunikationsnetze und -dienste“ (**Rahmenrichtlinie**, 2002/21/EG), (*Europäischer-Rat, 2002b*), in der diesbezüglich die Entscheidung 91/396/EWG (s.o.) aufgehoben wird, um sie abgeändert und erweitert wieder zu formulieren in der „*Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates* vom 7. März 2002 über den Universaldienst und Nutzerrechte bei elektronischen Kommunikationsnetzen und –diensten“ (**Universaldienstrichtlinie**, 2002/22/EG), (*Europäischer-Rat, 2002a*). Hierin heißt es in Verbindung mit der Notrufnummer 112:

- Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass *Notrufe von öffentlichen Münz- und Kartentelefonen* mit der Nummer 112 und anderen nationalen Notrufnummern *kostenlos und ohne Verwendung eines Zahlungsmittels* durchgeführt werden können (*Art. 6, Abs. 3*).
- Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass alle *Endnutzer öffentlich zugänglicher Telefondienste*, einschließlich der Nutzer öffentlicher Münz- und Kartentelefone, zusätzlich zu etwaigen anderen nationalen Notrufnummern (...), *gebührenfreie Notrufe* mit der *einheitlichen europäischen Notrufnummer 112* durchführen können (*Art. 26, Abs. 1*).

- Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass Notrufe unter der Nummer 112 *angemessen entgegenenommen* und auf eine Weise bearbeitet werden, die der nationalen Rettungsdienstorganisation am besten angepasst ist und den technischen Möglichkeiten der Netze entspricht (*Art. 26, Abs. 2*).
- Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass die Unternehmen, die öffentliche Telefonnetze betreiben, den Notrufstellen bei allen unter der Notrufnummer 112 durchgeführten Anrufen **Informationen zum Anruferstandort** übermitteln, *soweit dies technisch möglich ist* (*Art. 26, Abs. 3*).
- Die Mitgliedstaaten gewährleisten, dass die *Bürger* angemessen über Bestehen und Nutzung der einheitlichen europäischen Notrufnummer 112 *informiert* werden (*Art. 26, Abs. 4*).

In (*Hose, 2002*) wird *Artikel 26, Abs. 3* dieser *Universaldienstrichtlinie* mit „... Informationen zum Anruferstandort übermitteln, soweit dies technisch möglich ist“ so ausgelegt, dass nur Technologien vorgeschrieben sind, die bereits erfolgreich im Markt eingesetzt werden, wie z.B. die Methode **Cell-ID** (*Kap. 3.3.2.*). So gesehen würden Notrufdienste ausschließlich auf jene Ortsbestimmungsmethoden zurückgreifen können, die mittlerweile für kommerzielle LBS eingesetzt werden. Da diese aber mangels Nachfrage in ihrer Entwicklung weit hinter früheren Erwartungen liegen, wird wenig in bessere Infrastruktur für die mobile Ortung investiert, was folglich die Qualität und den Nutzen von Notrufdiensten wie E-112 stark beeinträchtigt.

Die bislang konkretesten Vorgaben der EU direkt zu den erweiterten Notrufdiensten E-112 erfolgten durch die „*Empfehlung der Kommission* vom 25. Juli 2003 zur **Übermittlung von Angaben zum Anruferstandort** in elektronischen Kommunikationsnetzen an um Standortangaben erweiterte Notrufdienste“ (*2003/558/EG*), (*Europäische-Komm, 2003*). Diese Empfehlung berücksichtigt alle vorangegangenen mehr oder minder involvierten Vorgaben der EU wie die Entscheidung zur Einführung der einheitlichen Notrufnummer 112, die Rahmen- und Universaldienstrichtlinie und die Datenschutzrichtlinie für elektronische Kommunikation (*2002/58/EG*).

Von der Kommission wurde zuvor bereits im Mai 2000 eine Koordinierungsgruppe für den Zugang zu Standortinformationen für Notrufdienste (**CGALIES**²⁵) gegründet, als partnerschaftliches Forum öffentlicher Stellen und des Privatsektors. Diese Gruppe erarbeitete Analysen, Berichte und Zeitpläne als Vorbereitung zur gemeinschaftsweiten Einführung der E-112-Dienste, z.B. veröffentlicht in (*CGALIES, 2002*).

Gemäß den Angaben von CGALIES sollten die Betreiber öffentlicher Telefonnetze *ihr Möglichstes tun*, um bei allen Anrufen unter der Notrufnummer 112 *die zuverlässigsten Standortinformationen festzustellen* und zu übermitteln. Weiters heißt es, dass in der Einführungsphase der E-112-Dienste die Anwendung des Grundsatzes, dass alle Beteiligten ihr Möglichstes tun, einer verbindlichen Vorgabe bestimmter Leistungsmerkmale für die Standortermittlung vorzuziehen ist. Sobald jedoch Notrufabfragestellen und Notdienste praktische Erfahrungen mit Standortangaben gesammelt haben, werden die Anforderungen genauer definiert. Außerdem wird sich die Technologie zur Ermittlung von Standorten sowohl im Rahmen von zellularen Mobilfunknetzen als auch von satellitengestützten Systemen weiter entwickeln.

²⁵ Abkürzung für: Coordination Group on Access to Location Information for Emergency Services.

Die Kommission bringt im Teil der **Empfehlung** selbst vorerst vier wichtige *Begriffsbestimmungen* in allgemeiner Formulierung, gültig für alle Mitgliedstaaten ((2003/558/EG), Abs. 2):

- „*Notdienst*“: ist ein vom Mitgliedstaat als solcher anerkannter Dienst, der eine sofortige und schnelle Hilfe in Situationen leistet, wenn beispielsweise eine unmittelbare Gefahr für Leib oder Leben, für die persönliche oder öffentliche Sicherheit oder Gesundheit, für private oder öffentliche Gebäude und Anlagen oder für die Umwelt besteht.
- „*Standortangaben*“: sind in einem öffentlichen Mobilfunknetz die verarbeiteten Daten zur *geographischen Position* eines Mobilfunknutzers und in einem öffentlichen Festnetz die Informationen über die *Installationsadresse* des Festnetzanschlusses.
- „*E-112*“: ist ein unter der einheitlichen europäischen Notrufnummer 112 erreichbarer Notrufdienst, der um die Übermittlung der Standortangaben des Anrufers erweitert ist.
- „*Notrufabfragestelle*“: ist eine Leitstelle, in der Notrufe unter behördlicher Kontrolle angenommen werden.

Weiters sollen die Mitgliedstaaten **Vorschriften für Betreiber eines öffentlichen Netzes** aufstellen, die folgende Bestimmungen enthalten, wobei hier nur jene angeführt sind, die sich auf **Standortangaben** beziehen:

- Mit jedem unter der Nummer 112 getätigten Notruf sollte der Netzbetreiber **die besten verfügbaren Angaben zum Anruferstandort** von sich aus automatisch an die Notrufabfragestellen übermitteln, *soweit dies technisch möglich ist* (Abs. 4).
- Betreiber öffentlicher Telefonfestnetze sollten die *Adresse des Teilnehmeranschlusses* zugänglich machen, von dem aus der Notruf abgeht (Abs. 5).
- Bei allen bereitgestellten Standortangaben sollte kenntlich gemacht werden, *aus welchem Netz* der jeweilige Anruf geführt wird (Abs. 7).
- Die Quellen für die *Standortinformationen*, z.B. Adressangaben, sollen *genau* sein und *auf dem neuesten Stand* gehalten werden (Abs. 8).

In Bezug auf die **Weiterentwicklung von Konzepten und Technologien** sowie einer **Überprüfung** macht die Empfehlung folgende Angaben:

- Die Mitgliedstaaten sollten die *Implementierung gemeinsamer Schnittstellenspezifikationen* zur Sicherstellung einer europaweiten Interoperabilität von Notfalldiensten unterstützen und die *Verwendung von Standorttechnologien höchster Genauigkeit*, wie solcher beruhend auf Zellulernetzen und globalen Navigationssatellitensystemen, fördern (Abs. 12).
- Die nationalen Behörden der Mitgliedstaaten sollen der Kommission bis Ende 2004 über den Stand der E-112-Einführung Bericht erstatten, so dass sie eine Überprüfung unter Berücksichtigung der Anforderungen von Notrufabfragestellen und Notdiensten sowie der *technischen Möglichkeiten zur Bestimmung des Standorts* durchführen kann (Abs. 13).

Es lässt sich zusammenfassend herausstreichen, dass die Kommission in dieser Empfehlung nur sehr allgemeine und vage Vorgaben macht, was die Standortangaben zu einem Notruf (E-112) betrifft. „*Die besten verfügbaren Angaben zum Anruferstandort*“ und das auch nur „*soweit dies technisch möglich ist*“ sowie „*die Verwendung von Standorttechnologien höchster Genauigkeit zu fördern*“ sind Formulierungen, die beinahe sämtliche Detailvorgaben (nur bei Festnetzanschlüssen wird kon-

kret die Adresse des Teilnehmers gefordert) der jeweiligen Legislative der einzelnen Mitgliedstaaten überlassen.

Dies ist aus mehreren Gründen ziemlich problematisch. Hoheitlich reglementierte LBS, wie dies **erweiterte Notrudienste** darstellen, in ihrem Kern, der Genauigkeit und Überprüfbarkeit von den dazugehörigen Standortangaben, dem wirtschaftlichen Kräfteressen unterschiedlicher Anbieter und Technologien in bereits überliberalisierten Märkten zu überlassen, kann in Extremsituationen einem Spiel zwischen Leben und Tod gleichkommen. Weiters ergeben sich große Schwierigkeiten daraus, dass alle Staaten der EU, sowohl die Gründungsmitglieder als auch alle neu hinzukommenden, ohne eindeutige Vorgaben, insbesondere was die Interoperabilität anbelangt, kaum auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen sind (man bedenke z.B. die unterschiedlichen Voraussetzungen in Deutschland oder Frankreich im Vergleich mit Polen oder Rumänien, vor allem jene bezogen auf das Jahr 2003), (*Wilde et al., 2004*).

Auch aus *wirtschaftlicher Betrachtung* ist es kurzsichtig, für Notfall-LBS zwar Standortangaben vorzuschreiben, bei Genauigkeit und Qualität es jedoch einer Vielzahl von Mitgliedstaaten mit sehr unterschiedlichen Sprachen, Kulturen, Organisationsformen sowie ehemaliger Wirtschaftssysteme zu überlassen, das jeweils beste daraus zu machen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen konkreten Vorgaben hinsichtlich der Ortungsgenauigkeit bei Notrufen und der gesamtheitlichen Entwicklung von kommerziellen LBS wurde in der Forschung bereits herausgearbeitet und dokumentiert (z.B. in einer umfangreichen Fallstudie zu den Verhältnissen in den USA, Europa, Japan und Neuseeland (*Petrova und Wang, 2008*)).

Deutschland hat in Ergänzung zu den entsprechenden Vorschriften über Notrufverbindungen ihres eigenen Telekommunikationsgesetzes (TKG) und in Umsetzung der Universaldienststrichlinie (2002/22/EG) sowie der Empfehlung der Kommission (2003/558/EG) bereits eine (nationale) **Verordnung über Notrufverbindungen** erlassen (*BMWT, 2009*), die im März 2009 in Kraft getreten ist. Es seien hier auszugsweise jene Vorgaben angeführt, die in Zusammenhang mit Art, Genauigkeit, Qualität und Überprüfbarkeit von Standortangaben bei der Betätigung des Notrufs 112 stehen und insbesondere die Empfehlungen der Kommission konkretisieren. Weiters werden einige Angaben zu Begriffen und Vorgangsweisen bei der Umsetzung der Verordnung gemacht, um einen Kontext herzustellen.

In der **Einleitung zur Notrufverordnung** heißt es:

Die **NotrufV** regelt ein *Informationsverfahren* über die von den Ländern und Kommunen festzulegenden Einzugsbereiche ihrer Notrufabfragestellen und sie zeigt den beteiligten Telefondiensteanbietern und Netzbetreibern auf, welche grundlegenden Anforderungen sie zu erfüllen haben. Das Informationsverfahren wird von der Deutschen Telekom AG als Rechtsnachfolgerin der Deutschen Bundespost auf eine *neutrale Bundesnetzagentur* übertragen.

Neben der europaeinheitlich vorgegebenen Notrufnummer 112 wird in der NotrufV die *Rufnummer 110* als zusätzliche nationale Notrufnummer festgelegt (§1 **Notrufnummern**). Dies ist, z.B. in (*Wilde et al., 2004*) näher analysiert, problematisch, da im konkreten Notfall oft Zweifel darüber besteht, welche Nummer zu verwenden sei, und dies stellt eine unnötige Verzögerung dar. Im Mobilfunk sind nationalen Notrufnummern, was ihre Priorisierung gegenüber anderen Verbindungen betrifft, überdies der 112 nicht völlig gleichgestellt.

In §2 werden wichtige **Begriffsbestimmungen** festgelegt, u.a.:

- „*Einzugsgebiet*“: ist der örtliche Zuständigkeitsbereich einer Notrufabfragestelle.
- „*Notrufabfragestelle*“: ist die nach Landesrecht zuständige Stelle zur Entgegennahme von Notrufen.
- „*Notrufanschluss*“: ist der Anschluss einer Notrufabfragestelle an das Telekommunikationsnetz für den ausschließlichen Zweck, Notrufverbindungen einschließlich der zugehörigen Daten entgegenzunehmen.
- „*Notrufverbindung*“: ist die über einen öffentlich zugänglichen Telefondienst zu einem Notrufanschluss aufgebaute Telefon- oder Telefaxverbindung, die durch Wahl einer Notrufnummer oder durch Aussenden einer (...) ausschließlich für Notrufe vorgesehenen Signalisierungsinformation eingeleitet wird, wobei das Endgerät zum Aussenden der Notrufnummer oder der entsprechenden Signalisierungsform veranlasst wird durch:
 - Eingabe einer Notrufnummer über die Ziffentasten,
 - Betätigen einer ausschließlich für den Notruf vorgesehenen Taste oder Tastenkombination oder
 - einen entsprechenden Auslösemechanismus.

Die Festlegungen zum Begriff *Notrufverbindung* sind am umfangreichsten ausgefallen, da für die Zukunft bereits geplant und von der EU vorgegeben wurde, Notrufe über die Nummer 112 auch automatisiert, z.B. ausgelöst durch einen Crashsensor in Kraftfahrzeugen, auszusenden (*eCall*, Kap. 3.1.4.).

Unter §4 **Notrufverbindungen** ist nun Folgendes festgehalten:

- Die an der Herstellung einer Notrufverbindung beteiligten Telefondiensteanbieter und Netzbetreiber haben dafür zu sorgen, dass diese unverzüglich zur örtlich zuständigen Notrufabfragestelle hergestellt wird. Maßgeblich für die Ermittlung der örtlich zuständigen Notrufabfragestelle ist der vom Telekommunikationsnetz festgelegte *Standort des Endgerätes*, von dem die Notrufverbindung ausgeht (Ursprung der Notrufverbindung), (*Abs. 1*).
- Der Telefondiensteanbieter, der den Notruf eines Teilnehmers entgegennimmt, hat folgende Daten zu ermitteln und als Teil der Notrufverbindung gemeinsam mit seiner Anbieterkennung an die Notrufabfragestelle weiterzuleiten (*Abs. 3*):
 - Die *Rufnummer des Anschlusses*, von dem die Notrufverbindung ausgeht, auch wenn die Rufnummernanzeige dauernd oder für einen Anruf unterdrückt ist und
 - *Angaben zum Standort des Endgerätes*, von dem die Notrufverbindung ausgeht.
- Das *automatische Herstellen einer Notrufverbindung* ohne unmittelbares Tätigwerden eines Menschen ist nicht zulässig (*Abs. 5*).

Dieser letzte Absatz bietet Schutz vor Missbrauch, reduziert Fehllarmer und soll ungewollte Fernortung durch Fremde unterbinden, womit man Bedenken von Datenschützern entgegengekommen ist. Im *Bereich des Mobilfunks* gibt es jedoch schon eine Ausnahme für den Fall eines *eCall*:

- Für Notrufverbindungen aus Mobilfunknetzen gilt ergänzend (*Abs. 7*):
 - Die Bestimmung der örtlich zuständigen Notrufabfragestelle erfolgt auf der Grundlage des vom Mobilfunknetz festgestellten Ursprungs der Notrufverbindung bei Verbindungsbeginn. Der *Ursprung der Notrufverbindung* ist *mindestens mit der Genauigkeit zu ermitteln, die dem Stand der Technik kommerziell genutzter Lokalisierungsdienste entspricht*. Solange es dem Stand der Technik entspricht, hat der Mobilfunknetzbetreiber *zumindest die Funkzelle* zugrunde zu legen (*Nr. 3*).

- Der Mobilfunknetzbetreiber hat den Notrufabfragestellen jene Informationen bereitzustellen, die für die Umsetzung von Funkzellenbezeichnungen (Cell-ID) in **geographische Angaben** erforderlich sind (Nr. 4).
- Das automatische Herstellen einer Notrufverbindung zur Nummer 112 ohne unmittelbares Tätigwerden eines Menschen mittels dafür vorgesehener, *in Kraftfahrzeugen installierter Einrichtungen (eCall)*, ist zulässig (Nr. 6).

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass der Gesetzgeber in Deutschland hinsichtlich Genauigkeitsvorgaben bei der Standortbestimmung für den Notruf mit Mobiltelefonen (E-112) lediglich den *Bereich der Funkzelle* fordert, solange dies *dem Stand der Technik kommerziell genutzter Lokalisierungsdienste entspricht*. Diese Formulierung bietet zwar unmittelbar die Möglichkeit im Rahmen dieser Verordnung genauere Methoden einzusetzen, lässt jedoch völlig offen, wann der Stand der Technik dies von sich aus erfordern würde und wer den Stand der Technik vorgibt.

Die *Angabe der Funkzelle* ist zwar die am einfachsten umzusetzende und mit jedem Handy verwendbare, aber ungenaueste Methode bei der Ortsbestimmung im Mobilfunk (Kap. 3.3.2.). Dies stellt in Bezug auf den Aufwand sowohl den Sinn als auch den Nutzen für „erweiterte Notrufdienste“, besonders im ländlichen Gebiet, wo Zellgrößen von mehreren Kilometern möglich sind, in Frage. Im Vergleich zu den USA (E-911, Kap. 3.1.2.) gibt Deutschland weder einen Genauigkeitsbereich noch ein Qualitätsmaß oder eine Zuverlässigkeit an. Es werden auch keine Überlegungen zu unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, wie z.B. innerstädtische Bereiche im Vergleich zu ländlichen Gebieten, angestellt.

Seit der Empfehlung der Kommission (2003/558/EG) hat die EU mit **mehreren neuen Verordnungen und Richtlinien** (vom Juni und November 2009 (*Europäischer-Rat, 2009b; a*)) einige kleinere Zusätze zu den bisherigen Vorschriften für E-112 erlassen:

- Wird man im europäischen Ausland über Roaming mit dem Netz seines Mobilfunkanbieters im Heimatland verbunden, so muss man per kostenlosem SMS darüber informiert werden, dass die Notrufnummer 112 zur Verfügung steht und wie hoch die personalisierten Roaminggebühren dafür ausfallen (neuer Artikel 6, Abs. 1 der Verordnung Nr. 717/2007 über das Roaming in öffentlichen Mobilfunknetzen der Gemeinschaft, „**Roaming-Verordnung**“).
- Der Artikel 26 der **Universaldienstrichtlinie** über „*Notrufdienste und die einheitliche europäische Notrufnummer*“ wurde erneuert und mit folgenden Ergänzungen bzw. Präzisierungen versehen (es sind hier nur die wichtigsten auszugsweise angeführt):
 - Die Mitgliedstaaten stellen (...) sicher, dass Unternehmen, die einen *elektronischen Kommunikationsdienst* für das Führen ausgehender Inlandsgespräche (...) bereitstellen, auch den Zugang zu Notdiensten gewährleisten (Abs. 2).
 - Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass der Zugang *behinderter Endnutzer* zu Notrufdiensten mit dem Zugang, über den die Mehrheit der Endnutzer verfügt, gleichwertig ist. (...) (Abs. 4).
 - Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass die betreffenden Unternehmen den die Notrufe bearbeitenden Stellen *unmittelbar nach Eingang des Anrufs* (...) gebührenfrei **Informationen zum Anruferstandort** übermitteln. (...) Die zuständigen Regulierungsbehörden legen Kriterien für die **Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Angaben zum Anruferstandort** fest (Abs. 5).
 - Zur Gewährleistung des effektiven Zugangs zum Notruf 112 in den Mitgliedstaaten kann die Kommission (...) *technische Durchführungsmaßnahmen* erlassen. (...) (Abs. 7).

Diese Zusätze betreffen in erster Linie *Verbindungen mittels VoIP bzw. VoLTE*, die in neueren LTE(-A)-Netzen zum Standard werden (*Kap. 2.1.2.4.*), und den *Zugang für behinderte Nutzer*. In Bezug auf die **Qualität der Standortermittlung** eines mobilen Notrufes werden die Kompetenzen dezidiert an die Regulierungsbehörden der einzelnen Mitgliedsländer weitergereicht. Zuletzt lässt sich die EU aber dennoch eine, wenn auch sehr allgemein gehaltene, Hintertür offen, um notwendige technische Durchführungsmaßnahmen in Zukunft erlassen zu können.

3.1.4. eSafety und eCall

Trotz vieler Diskussionen, Berichte und Studien, z.B. in (*Koolen, 2002; Wilde et al., 2004; Paul-Morandini, 2006*), blieb es in der EU vorerst dabei, dass die Genauigkeit, Qualität und Überprüfbarkeit bei der Bestimmung von Standorten in Zusammenhang mit der Betätigung des **Notrufes 112** den technischen und wirtschaftlichen Ambitionen des Marktes, geleitet durch Anbieter von Mobilfunk, kommerziellen LBS und Technologien zur Ortsbestimmung, überlassen wurden. Es gab sogar die Argumentation (u.a (*Goldman, 2003*)), dass der Druck der öffentlichen Nachfrage nach Notrufdiensten mit genauerer Ortung in der EU zu denselben Standards hinsichtlich Qualität führen würde, wie in den USA. Dies konnte jedoch inzwischen eindeutig widerlegt werden, z.B. nach Untersuchungen in (*Petrova und Wang, 2008*).

Die Europäische Kommission wandte sich in ihren Bemühungen in Sachen Notruf und Rettungsmaßnahmen aber auch einem weiteren Bereich zu, der europäischen Verkehrspolitik und den damit verbundenen Sicherheitsaspekten. Im **EU-Weißbuch** „*Die europäische Verkehrspolitik bis 2010*“ vom September 2001 setzte man sich als Ziel, die Zahl der im Straßenverkehr Getöteten um 50% zu senken. Die Kommission initiierte daraufhin im die **eSafety-Initiative** mit der allgemeinen Vorgabe, durch gemeinsame Anstrengung von Industrie und öffentlicher Hand die Zahl der Unfälle durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien zu senken.

Zur Verfolgung dieser Ziele wurde eine **eSafety Task-Force** gebildet, die im November 2001 einen umfassenden Bericht mit 28 Empfehlungen vorlegte. Darauffolgend entstand das **eSafety-Forum**, das sich wiederum aus *11 Arbeitsgruppen* zusammensetzte. Die Aufgaben dieses Forums sind die Förderung und Unterstützung von Entwicklung, Umsetzung und Nutzung intelligenter Verkehrs- und Fahrzeugsicherheitssysteme sowie ein Monitoring der Umsetzung der Empfehlungen (*Buck, 2005*).

Eine dieser 11 Gruppen des eSafety-Forums bildete die **eCall Driving Group**, die zuständig ist für die Einführung einer *pan-europäischen Fahrzeug-Notruf-Infrastruktur* und eines *dazugehörigen Geschäftsmodells*. Im Juni 2003 erschien das europäische Aktionsprogramm für die Straßenverkehrssicherheit und im September desselben Jahres die erste Mitteilung der EU-Kommission „*Informations- und Kommunikationstechnologien für sichere und intelligente Fahrzeuge*“, dessen wichtigste Einzelmaßnahme **eCall**, ein Notrufsystem in Fahrzeugen, darstellt (*Abb. 3–3.*).



Abb. 3–3.: eCall-Logo
(Information-Society, 2011)

Im September 2005 veröffentlicht die EU-Kommission die zweite eSafety-Mitteilung „*Verbreitung des eCall-Systems unter den Bürgern*“ und im Oktober darauf wird mit der Initiative **i2010 Intelligent Car** weiter in die Zukunft gedacht, z.B. durch Einführung eines *Antikollisionsradars für Autos*, dessen Frequenzbereich europaweit bereits festgelegt wurde (Klaß, 2005; Pakalski, 2005).

Die wesentlichen **Erwartungen an eCall** sind (Buck, 2005):

- eine *Reduktion der durchschnittlichen Reaktionszeit bei einem Unfall* (50% in ländlichen und 40% in städtischen Gebieten)
- eine *Reduzierung der Unfallschwere* (15% geringere Kategorie des Personenschadens)
- eine jährliche *Verminderung der Anzahl der Unfalltoten* (ca. 2000 in den EU-15)
- *volkswirtschaftliche Kosteneinsparungen*, die die erforderlichen Investitionen in das System um ein Mehrfaches überschreiten (ca. 21 Mrd. € / Jahr in den EU-15)

Gerade die Reaktionszeit bei einem Unfall hängt wesentlich von der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ortung des Unfallfahrzeuges ab. Durch die Kombination mit automatisierten Navigationsdiensten, die Einsatzfahrzeuge direkt zum Unfallort leiten, kann die Reaktionszeit weiter verringert und somit das gesamte System optimiert werden.

Das Fahrzeug-Notrufsystem **eCall** wurde über das eSafety-Forum und die eCall Driving Group vorerst als ein „*Memorandum of Understanding (MoU) for Realisation of Interoperable In-Vehicle eCall*“ mit sehr allgemein gehaltenen Aussagen zu Zielsetzung, Definition, Rahmenbedingungen, involvierten Parteien, dem Sinn einer Unterzeichnung und dem Umsetzungsprozess formuliert (eSafety-Forum, 2004). Als notwendige Unterzeichner sind, neben der EU-Kommission selbst und den einzelnen Mitgliedstaaten, die Mobilfunkbetreiber, die Notrufzentralen und Rettungsorganisationen, die Automobilindustrie und Versicherungsbranche sowie diverse Industriepartner bedacht. Letztere sind für den Auf- und Ausbau der nötigen Infrastruktur, darunter auch entsprechende Ortsbestimmungstechnologien, zuständig.

Dieser Weg der **Umsetzung von eCall** über ein MoU hatte zur Folge, dass Unterschriften nur sehr zögerlich und mit großer Verspätung geleistet wurden. Gründe dafür waren das Fehlen eines klar formulierten und tragfähigen Geschäftsmodells, das Kosten und Nutzen des Systems unter allen Beteiligten sinnvoll und gerecht verteilt, ein realistischer Roll-out Plan sowie die notwendigen Standardisierungen für die Infrastruktur. Dies führte trotz großer Anstrengungen und *weiterer Mitteilungen der EU-Kommission* bereits zu mehreren Verschiebungen des ursprünglichen Einführungstermins, zu dem (zumindest) ein jeder Neuwagen in der EU hätte mit eCall ausgestattet sein sollen, von Anfang 2009 auf 2014 und weiters 2015 (Europäische-Komm, 2009b).

Letztendlich jedoch ist die Einführung von eCall beruhend auf Freiwilligkeit und dem MoU gescheitert. Die Kommission ging daraufhin den Weg einer *verpflichtenden Gesetzesvorgabe*. Nach weiteren exzessiven Diskussionen und Abstimmungen im Parlament und Rat konnten neue Details, sowohl für Fahrzeuge als auch die Notrufannahmestellen, und weitere diesbezügliche Einführungsfristen bis Anfang April 2018 bzw. Anfang Oktober 2017 erreicht werden (Krempf, 2014).

Technisch gesehen ist eCall (*in vehicle emergency call*) ein in Fahrzeugen integrierbares, europaweit einheitliches, Notrufsystem, das, basierend auf den Standards von E-112, bei einem Unfall manuell oder automatisch einen **Notruf über Mobilfunk** an die nächstgelegene Notrufzentrale absetzt. Hier-

bei kann der Notruf per *Knopfdruck* (manuell) oder, in Fällen, wo dies nicht möglich ist, durch *Crash-Sensoren* bzw. *Airbags* (automatisch) ausgelöst werden. Der Notruf selbst baut eine Sprach- und Datenverbindung zur Einsatzzentrale auf, wobei vorweg bestimmte Informationen zum Unfall in jedem Fall übertragen werden (*Europäische-Komm, 2009a*). *Abb. 3–4.* zeigt die Zusammenhänge in einer vereinfachten Graphik.

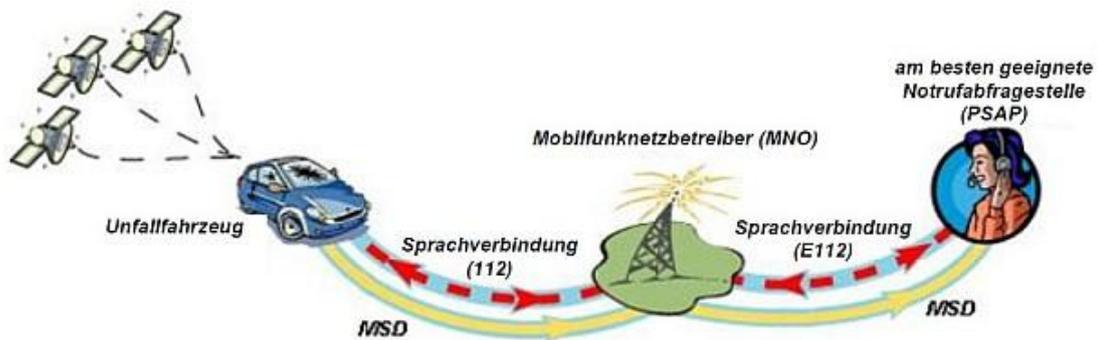


Abb. 3–4.: Funktionsweise von eCall (Europäische-Komm, 2009a)

Auf ein fixes Minimum an Daten für diese Übertragung (*Minimum Set of Data, MSD*) einigte man sich bereits im MoU, wo dies schriftlich festgehalten ist. Darunter befinden sich die Unfallzeit, die **exakte Lokalisierung des Unfallortes** (derzeit nur mittels GNSS), die Fahrzeugidentifikation und die Information, ob der Notruf manuell oder automatisch ausgelöst wurde. Weitere Daten waren und sind in laufender Diskussion, sowohl von technischer als auch von datenschutzrechtlicher Seite, und können sukzessive in einen erweiterten Notrufprozess integriert werden (z.B. die letzte relevante Geschwindigkeit und Fahrtrichtung, wie viele Personen befinden sich im Fahrzeug, hat es einen Überschlag gegeben, usw.). Dies erfolgt jedoch in Form von zusätzlichen kommerziellen Diensten, die von den Automobilherstellern angeboten werden können und auf einer eigenen Infrastruktur beruhen (*Müller, 2014*).

3.1.5. Besserer Wettbewerb durch bessere Dienste

Mobilfunkanbieter versuchen laufend, sich durch **umfangreiche Dienste** gegenüber ihrem Mitbewerb zu profilieren. Den Kundenstock zu halten bzw. auszubauen und den Umsatz pro Kunde (*average revenue per user, ARPU*) zu steigern gelingt heute jedoch nicht mehr alleine durch unterschiedlich gestaltete Tarifmodelle. *SMS, MMS* und *mobile Datenverbindungen* hoher Bandbreite zeigen, dass ein Mobilfunknetz mit Erfolg wesentlich mehr bieten kann als nur Sprachübertragung, die bereits auf einem qualitativ sehr hohen Niveau stattfindet.

Von den vielen möglichen Diensten sind jene von besonderem Interesse, deren Informationsgehalt mit einem *geographischen Standort* zusammenhängt (*Petrova und Wang, 2008*). Informationen dieser Art besitzen eine **höhere Wertigkeit**, da sie nicht nur dem Inhalt nach, sondern auch über geographische Bezüge angeboten und dadurch mit weiteren Informationen und Diensten verknüpft werden

können. Diese **Location Based Services** (LBS) bedingen also stets die Bekanntgabe eines Ortsbezuges bzw. die Durchführung einer Ortsbestimmung unterschiedlicher Genauigkeit mittels des mobilen Endgerätes, das im jeweiligen Mobilfunknetz eingebucht ist (*Kap. 3.3.*). Gerade diese Voraussetzung ist jedoch einer jener gewichtigen Gründe, warum im vom *Datenschutz* geprägten Europa LBS nur sehr zögerlich und mit großem Vorbehalt angenommen werden.

Das Wissen wann, wo und vor allem wie genau ein Mobilfunkgerät *geortet* werden kann, was mit diesen Informationen passiert und wie lange sie gespeichert bleiben (dürfen), ist im deutschen Sprachraum nicht sehr verbreitet (*Mansmann, 2010*). Dies erzeugt eine große Unsicherheit bei potentiellen Kunden, wenn sie darüber nicht eingehend in Kenntnis gesetzt werden und diese Aspekte nicht rechtlich, z.B. im Vertrag oder in den AGB, festgehalten werden. Zusätzlich könnte jedes mobile Gerät die Einstellmöglichkeiten bieten, vor Durchführung einer Ortsbestimmung vom Kunden eine Bestätigung bzw. sogar einen speziellen Code abzufragen. Wenn gewünscht, sollten auch sämtliche Ortungsmöglichkeiten, die über die Cell-ID hinausgehen, komplett zu sperren sein.

Neben diesen datenschutzrechtlichen Bedenken kommt vor allem dem besonderen **Nutzen eines LBS** eine Bedeutung zu, den der Kunde erkennen muss, um dafür auch bezahlen zu wollen (u.a. (*Petrova und Wang, 2008*)). Nur wenn man Informationen bzw. Dienste mobil gegenüber anderen Medien oder Quellen (Zeitung, Radio, Teletext etc.) auf eine bestimmte Weise, in einer gewissen Form und mit entsprechender Geschwindigkeit beziehen kann, werden durch diesen Mehrwert LBS vom Kunden akzeptiert.

Beispielsweise kann die Frage: „*Wo bitte ist jetzt auf die Schnelle der nächste Bankomat?*“ in einem unbekanntem Gebiet auch von einem freundlichen Passanten beantwortet werden, doch dieser wird den Suchenden (meistens) nicht dorthin begleiten. Ein Navigationsservice tut dies jedoch schon und macht auch sofort darauf aufmerksam, sollte man sich dennoch im Weg irren. D.h. *LBS können auch sinnvoll miteinander kombiniert werden* bzw. selbständig tätig werden, was jedoch meist, wie auch in diesem Beispiel, Ortsbestimmungen unterschiedlicher, in vielen Fällen sehr hoher und konsistenter, Genauigkeit voraussetzt (*Wunderlich, 2003; Wilmes und Raubal, 2005*). Dies ist jedoch heute in Europa einheitlich noch nicht möglich, abgesehen von proprietären Lösungen mittels (A-)GNSS oder WLAN auf Applikationsebene. Dadurch wird die Einführung attraktiver LBS wie z.B. spezieller *Personennavigationsdienste* (u.a. in der Touristenbranche) oder *allgemeiner* (E-112) und *besonderer* (Bergrettung, Betreuung von Personen mit Herzkreislaufproblemen, Alzheimer etc.) *Notfalldienste* wesentlich erschwert.

3.2. Aufbau von LBS und Standortgenauigkeiten

Die Diskussion über mobile standortbezogene Dienste, sogenannte **Location Based Services** (LBS), wird durch die breite Palette an möglichen Angeboten sowie der Komplexität der involvierten Technologien aus sehr verschiedenen Blickwinkeln geführt. Auch bedingt der weit gestreute Kontext der Anwender bei genauerer Betrachtung eine sehr differenzierte Herangehensweise. Für den Fokus dieser Arbeit seien hier nur einige wichtige Begriffe und Übersichten zur Thematik gebracht.

3.2.1. Architektur eines LBS

Abb. 3–5. soll als Überblick die dort genannte „**Architektur für LBS**“ zeigen (Brimicombe und Li, 2009). Mit der Möglichkeit den Standort seines eingeschalteten Mobilgerätes mit unterschiedlichen Methoden bestimmen zu lassen (Kap. 3.3.), kann ein Nutzer über das Funknetz von seinem Anbieter und dessen Partnern oder weiteren Dienstleistern im Internet auf seine Position maßgeschneiderte Informationen beziehen.

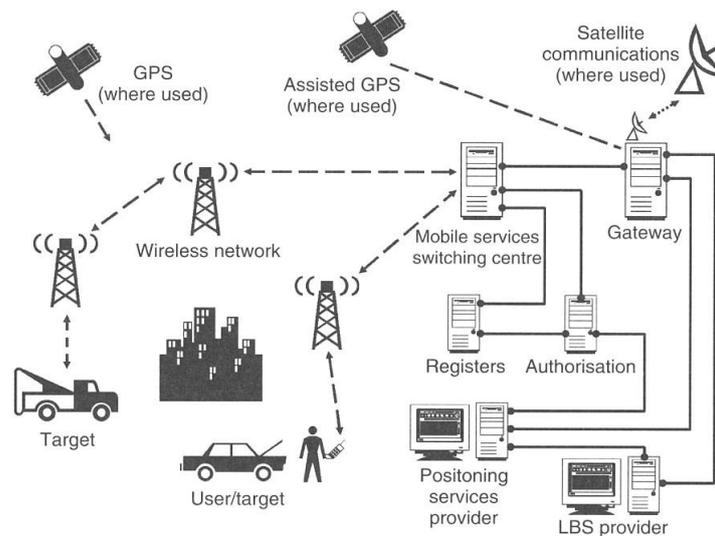


Abb. 3–5.: Architektur für LBS (Brimicombe und Li, 2009)

(Smith et al., 2001) wiederum sehen die **Entwicklung von LBS** als Folge der Integration von vernetzten Computern, Technologien für die Ortsbestimmung und der drahtlosen Kommunikation (Abb. 3–6.). Sie betonen die Wichtigkeit der Organisation von räumlichen Daten (*Spatial Data Infrastructure*, SDI), die notwendig ist, um sinnvolle Antworten auf Diensteanfragen zu generieren. In diesem Zusammenhang wird auch, vorausgesetzt sowohl die Daten der Diensteanbieter als auch die abfragenden Nutzer haben einen eindeutigen geographischen Bezug, von einem **mobilen GIS** (*Geographisches Informationssystem*) gesprochen.

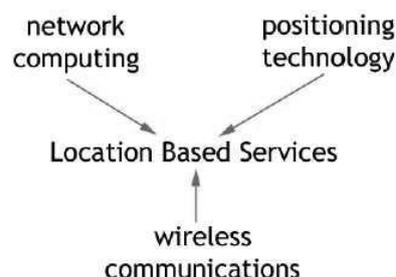


Abb. 3–6.: Beitragende Aspekte zu LBS (Smith et al., 2001)

In (Wohlert, 2000) werden **LBS** als eine *Familie von Diensten* betrachtet, die abhängen vom Wissen des geographischen Ortes des mobilen Endgerätes. Abb. 3–7. zeigt die logischen Zusammenhänge

bei dessen Ermittlung. Ortsinformationen werden von Applikationen angefragt, die auch als „Clients“ bezeichnet werden. Diese befinden sich außer- oder innerhalb des Netzwerkes oder im mobilen Gerät selbst. Die Positionsanfragen werden von einem Server empfangen, der eine Lokalisierung der „Ziel-MS“ (Mobilgerät) mit bestimmten Methoden im Mobilfunknetz durchführen lässt (Kap. 3.3.) und diese Ortsinformationen in einer gewissen Form an die Applikation zurückliefert.

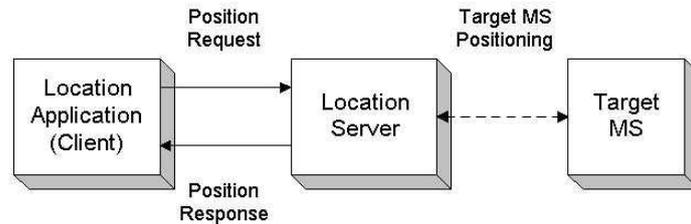


Abb. 3–7.: Funktionalismus bei der Ortsbestimmung für LBS (Wohlert, 2000)

Eine Studie zum LOCUS-Projekt (*LOcation of Cellular Users for Emergency Services*), das die EU bei der Entwicklung eines einheitlichen europaweiten Notrufsystems mit automatischer Standortbestimmung (E-112, Kap. 3.1.3.) unterstützte, schlägt z.B. eine **Gliederung der LBS** nach *Art der Dienste* vor und bringt einige Beispiele dafür (IST, 2001b):

- **Public Provided Emergency Call Services** (Type 1):
E-112: Police, Fire Brigade, Mountain Rescue
- **Commercial Provided Assistant Services** (Type 2):
Roadside Assistance, Car Theft Protection, Personal Assistance
- **Mobile Value Added Services, M-VAS** (Type 3):
Location Information Services, Tracking and Tracing, Location based Billing

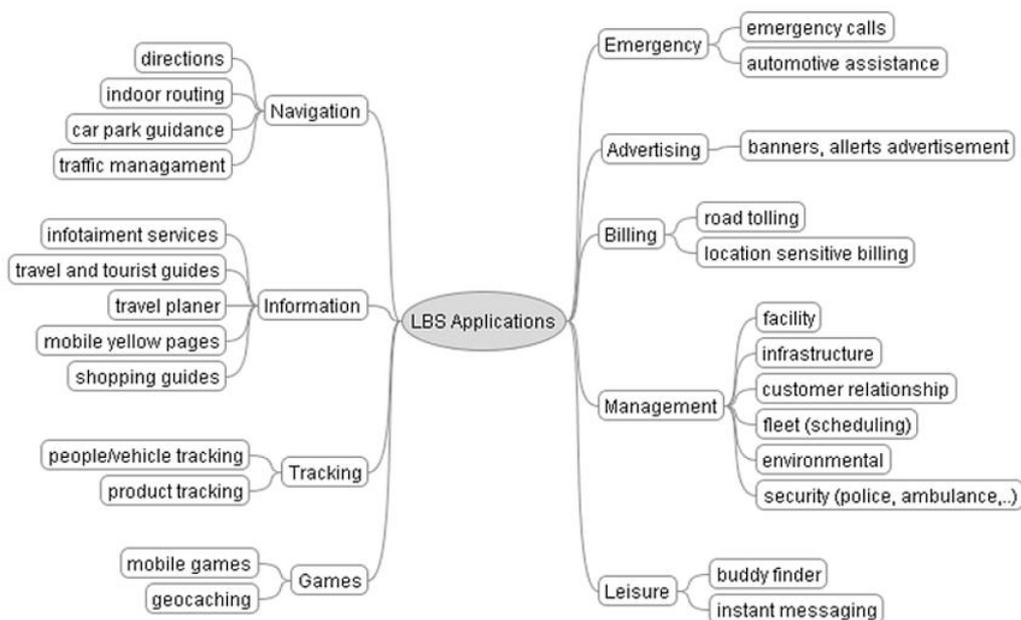


Abb. 3–8.: Applikationskategorien bei LBS (Steiniger et al., 2006)

Abb. 3–8. wiederum zeigt eine **Gliederung der LBS** nach *unterschiedlichen Applikationskategorien* (Steiniger et al., 2006).

3.2.2. Standortgenauigkeit für unterschiedliche LBS

Location Based Services setzen ganz verschiedene Bereiche der **Standortgenauigkeit** des mobilen Gerätes voraus. Es ist weder notwendig noch wirtschaftlich sinnvoll, stets mit einer maximal technisch erreichbaren Genauigkeit zu operieren, um einen Dienst für den Kunden zufriedenstellend anzubieten. Mobilfunk- und Diensteanbieter müssen diesbezüglich analysieren, welche LBS sie zur Verfügung stellen wollen bzw. für ihre Kunden von Interesse sind (Haselgrübler, 2002; Petrova und Wang, 2008). Die *GSM North American Interest Group* (GSM-NA) gibt für die notwendige Genauigkeit einige Beispiele an (Tab. 3–3.).

Standortgenauigkeit	LBS (Beispiele)
ortsunabhängig	Börsenkurse, Sportberichte
Region (bis zu 200 km)	Wetterbericht, Wetterwarnungen, Verkehrsinfos für Routenplanung
Ort (bis zu 20 km)	lokale Nachrichten, Verkehrsberichte
bis zu 10 km	Flottenmanagement, Stauwarnungen
500 m bis 1 km	Management von Außendienstmitarbeitern, Info-Dienste im ländlichen und vorstädtischen Bereich
100 m (67%), 300 m (95%)	E-911 Notruf bei Netzwerk-basierenden Ortsbestimmungsmethoden (FCC)
75 – 125 m	Tracking von Gütern, Info-Dienste in Städten (wo ist der nächste Bankomat etc.?)
50 m (67%), 150 m (95%)	E-911 Notruf bei Endgeräte-basierenden Ortsbestimmungsmethoden (FCC)
10 – 50 m	genaue Lokalisierung von Personen, Tieren und Gütern, Personennavigation

Tab. 3–3.: Beispiele von LBS zu unterschiedlichen Standortgenauigkeiten (Wohlert, 2000)

Die GSM-NA fasst zusammen, dass sich die Mehrheit interessanter **Value Added Services** (VAS, Kap. 3.2.1.) betreiben lässt, wenn **Genauigkeiten** zwischen 25 und 200 m in der Ortsbestimmung erreicht werden können. Weiters sei angemerkt, dass die geforderten Genauigkeitswerte stets innerhalb einer gewissen *Antwortzeit* erreicht werden sollen, wobei hier meist von 5 *Sekunden* ausgegangen wird. Längere Antwortzeiten ermöglichen i.A. eine höhere Genauigkeit. Einerseits hängen akzeptable Antwortzeiten von der Art des Dienstes ab, andererseits benötigen verschiedene Ortungstechniken unterschiedlich lange, um ein Ergebnis zu erzielen. Darüber hinaus sind sie auch noch in ihren allgemeinen Genauigkeitspotentialen, abhängig von der jeweiligen Umgebungssituation, differenziert.

Auf diese Zusammenhänge nimmt auch die FCC ansatzweise Rücksicht in ihren mehrmals abgeänderten *Genauigkeitsanforderungen* für **E-911** (Tab. 3–1.). Die EU hat diesbezüglich noch keine konkreten Vorgaben gemacht, es gibt jedoch Untersuchungen, die sich mit der *Genauigkeit der Lokalisierung* bei **E-112** auseinandersetzen. In (Wilde et al., 2004) ist dazu z.B. eine Umfrage publi-

ziert, die unter offiziellen Vertretern mehrerer EU-Mitgliedsländer durchgeführt wurde und Vorschläge zur Genauigkeit der Standortbestimmung beim mobilen Euronotruf sammelte (Tab. 3–4., Angaben in Meter).

Mitgliedsland	Urban	Suburban	Rural	Indoor	Crossroads
1	20	50	100	20	100
2	<10	10 – 50	100	<10	20 – 50
3	wie FCC	wie FCC	wie FCC	wie FCC	wie FCC
4	50	50	100	<50	<100
5	30	100	100	5	5
6	10	10	10	10	10
7	30	50	100	30	30

Tab. 3–4.: Vorgeschlagene Genauigkeiten zur Standortbestimmung bei E-112
(Wilde et al., 2004)

Ein weiterer interessanter Ansatz für notwendige Genauigkeiten bei der Standortbestimmung für bestimmte LBS wird in (Smith et al., 2001) präsentiert. Es ist der enge Zusammenhang zwischen diesen Genauigkeiten und dem *Kartenmaßstab* aufgezeigt, in dem die Dienste auf Grund ihrer *räumlichen Datenstruktur* bestmöglich visualisiert werden können. Dazu sind in einer Fallstudie vier (bereits implementierte) Beispiele aus unterschiedlichen Ebenen der Datenstruktur beschrieben:

- **Lokal:** Suche nach freien Parkplätzen und Routenführung
- **Stadt, Bezirk:** Suche nach Restaurants und Geschäften
- **Staat:** Flottenmanagement
- **Kontinent, weltweit:** Tracking und Monitoring (z.B. von Paketen)

3.3. Ortsbestimmungsmethoden für LBS

Dieses Kapitel soll einen Überblick geben, welche **Arten der Standortbestimmung** in Mobilfunknetzen unterschieden werden und auf *Terminologie* sowie *Methodik* eingehen. Nachrichtentechnische Besonderheiten und Details zu unterschiedlichen Implementierungen verschiedener Technologieanbieter werden jedoch meist außer Acht gelassen, da sie nicht im Fokus dieser Arbeit stehen. Gegebenenfalls wird auf einschlägige Literatur verwiesen.

Zuerst sei betont, dass der *Schwerpunkt der beschriebenen Methoden* bei den zellularen Mobilfunknetzen der 2. und 3. Generation (Kap. 2.1.2.2. und Kap. 2.1.2.3.) liegt. Weiters ist die Darstellung auf jene beschränkt, die in der praktischen Implementierung (in unterschiedlichen Testszenarien) eine gewisse Bedeutung erlangt haben bzw. dies für die Zukunft gut absehbar ist. Es gab und gibt jedoch umfangreiche Forschungsarbeit zu Themenstellungen, die sich z.B. mit der Lokalisierung von mobilen Geräten in unterschiedlichen Gebäuden ober und unter Tags oder in den zukünftigen Netzen der

(nach ITU) 4. Generation (Kap. 2.1.2.4.) beschäftigen (u.v. (Kistenich, 2005; Retscher und Thienelt, 2006)). Abb. 3–9. gibt einen einfachen und guten Gesamtüberblick zu bestehenden Ortsbestimmungsmethoden, zeigt in welchen Netzen sie operieren und wo die Technik hauptsächlich angewendet wird.

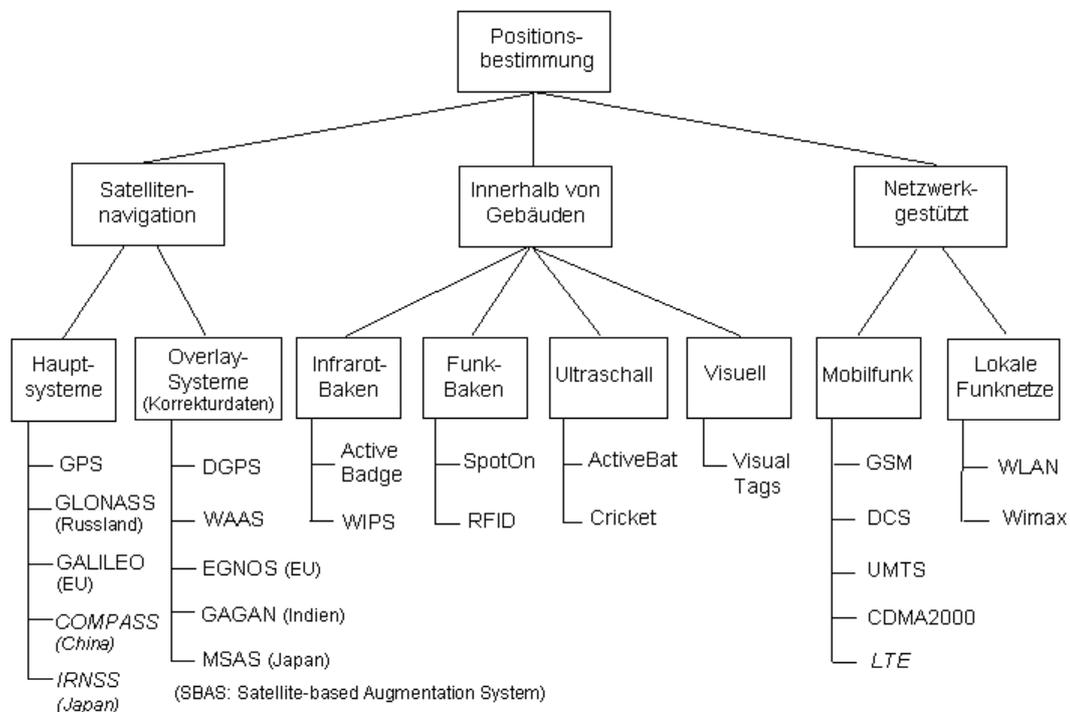


Abb. 3–9.: Überblick zu Ortsbestimmungsmethoden (Irmscher, 2009)

Es sei vorweggenommen, dass sich die **Mobilfunkortung** mit der fortschreitenden Entwicklung der 4G-Netze (z.B. *LTE-Advanced*, Tab. 2–2.) wesentlich ändern wird (müssen), da die Tendenz zu einer *hohen Verdichtung* mit Klein- und Kleinstzellen sowie „Heimzellen“ (in der Literatur auch mit *Femtozellen* bezeichnet (Abb. 2–22.)) und höheren Frequenzen, mit zwar geringerer Mehrwegeproblematik, jedoch wesentlich höherer Dämpfung, heute schon absehbar ist. Darüber hinaus ist eine *Integration von Methodiken*, die heute noch getrennt in großen und kleinen Räumen agieren, sowohl was ihre funktechnische Verfügbarkeit, als auch die Verbindung der messtechnischen Werte bei der Berechnung der Position betrifft, zu erwarten (z.B. Mobilfunk mit GNSS, WLAN, Bluetooth, NFC oder RFID, (Abb. 2–21. und Kap. 2.1.2.4.)).

Weiters sei eine Abgrenzung gesetzt zum Forschungsbereich der *Augmented Reality* (AR), die in ihren Thematiken die Ortsbestimmung und Orientierung ebenfalls betrachtet (u.a. (Reitmayr und Schmalstieg, 2003; Barczok et al., 2009)). *Wirtschaftliche Überlegungen*, die einer jeden technischen Entwicklung einen mehr oder minder starren Rahmen vorgeben, seien hier nur am Rande erwähnt. Sie spielen jedoch, insbesondere bei der Diskussion um E-911, E-112 und E-119 (in Japan), eine maßgebliche Rolle (Fritsch und Muntermann, 2005; Tsujino, 2005; Navratil und Grum, 2007; Petrova und Wang, 2008).

Umgekehrt bieten *Ortsbestimmungsmethoden mit unterschiedlichen technischen Lösungsansätzen* natürlich auch eine gewisse Bandbreite an verschiedener Genauigkeit und somit erst die nötigen Voraussetzungen, um zufriedenstellend ein gewisses Angebot an differenzierten ortsabhängigen Diensten zur Verfügung stellen zu können (Kap. 3.2.2.). Dass die Genauigkeit einer Ortsbestimmung nicht primär an die Methode geknüpft werden kann, wird u.a. in Kap. 5. und Kap. 6. untersucht, womit eine Diskussion darüber hier ausgespart bleiben soll.

3.3.1. Einteilung der Methoden

Ortsbestimmungsmethoden lassen sich nach sehr *unterschiedlichen Gesichtspunkten* gliedern. Es seien hier einige Möglichkeiten mit Beispielen angeführt, wobei anzumerken ist, dass die Grenzen nicht scharf und eindeutig gezogen werden können und dies in der Literatur z.T. auch sehr unterschiedlich diskutiert wird (u.v. (IST, 2001a; Brimicombe und Li, 2009)). Abb. 3–10. zeigt eine Graphik, die Methoden zuordnet und nach einem möglichen Genauigkeitspotential einstuft.

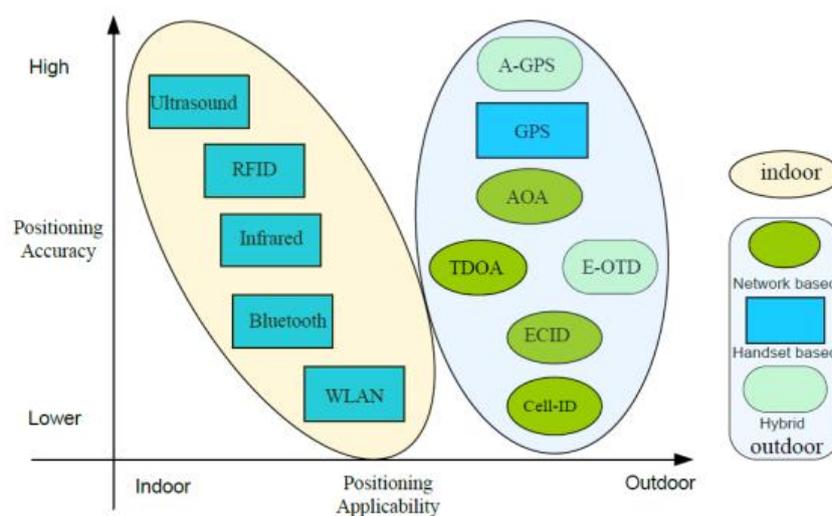


Abb. 3–10.: Genauigkeitspotential von verschiedenen Ortsbestimmungsmethoden (Wang, B., 2008)

- Nach **Art der Netze**, in der sie eingesetzt werden²⁶:
 - zellulare *Mobilfunknetze* (GSM, UMTS, LTE(-A), CDMA)
 - globale/lokale *Satellitennetze* zur Navigation (GNSS: GPS, GLONASS, Galileo oder Compass/Beidou; WAAS, EGNOS, QZSS/MSAS oder IRNSS/GAGAN als Ergänzungs- sowie Korrekturdatensysteme)
 - *Netze*, die vorwiegend als *Datenverbindungen* dienen (WLAN/WiFi, WiMAX, Bluetooth, UWB)
 - *Netze zur Identifikation* von Personen und Gegenständen (RFID, NFC, Bluetooth)

²⁶ Die angeführten Beispiele in Klammern (ff.) sind jeweils exemplarisch, nicht umfassend.

- Nach **Größe der Netze** bzw. Reichweite der Signale:
 - *Wide Area Networks* (WAN: Mobilfunknetze, Satellitennetze)
 - *Metropolitan Area Networks* (MAN: WiMAX)
 - *Local Area Networks* (LAN: WiFi, UWB)
 - *Personal Area Networks* (PAN: Bluetooth, NFC, RFID)
- Nachdem, **wo die Ortsbestimmung stattfindet** (das Ermitteln von Messgrößen bzw. die Berechnung der Position oder beides; diese Einteilung wird sehr zwiespältig diskutiert, bisweilen stellt man auch auf die „Hauptintelligenz“ einer Methode ab):
 - im Empfänger / mobilen Gerät (*handset-based*, auch *terminal-*, *device-* oder *MS-based* genannt)
 - im Netz (*network-based*)
 - gemischt (*handset-*, *MS-* bzw. *network-assisted*, mitunter wird hier auch der Begriff „*hybrid*“ bemüht)
- Nachdem, **was gemessen bzw. ermittelt wird**:
 - *Laufzeitmessungen* von Signalen (absolute bzw. Differenzen, danach ergeben sich geometrisch Kreise/Kugeln bzw. Hyperbeln/Hyperboloide für die möglichen Aufenthaltsörter der mobilen Geräte: TOA, TDOA, RTD, GPS)
 - *Winkeln* bzw. *Azimute* von ein- oder ausgehenden Signalen bei Antennenfeldern oder Richtantennen (AOA, AOD)
 - *Signalstärke* (Kreise/Kreisringe: RSS)
 - *Signalmuster* (Vergleich mit koordinativ bekannten Mustern in einer Datenbank (Signalmustererkennung, „*Pattern Matching*“): Mobilfunk, WLAN)
 - *Identifikation* (mobiles Gerät befindet sich im Empfangsbereich eines Senders/Empfängers („*Proximity*“): Cell-ID im Mobilfunk, bei WLAN, Bluetooth, RFID oder NFC)
- Nach dem **Messprinzip**:
 - *Multilateral* (mehrere Basisstationen nehmen Messungen vor: TOA, AOA)
 - *Unilateral* (ein mobiles Gerät nimmt Messungen von mehreren Basisstationen vor: E-OTD, A-FLT)
 - *Bilateral* (es wird nur eine Messung zwischen Basis- und Mobilstation durchgeführt: Mustererkennung)

3.3.2. Die Zelle selbst als Standort

Im zellularen Mobilfunk ist das *Versorgungsgebiet* eines Anbieters mit Zellen unterschiedlicher Größe und Form und den jeweils notwendigen Überlappungen abgedeckt (Kap. 2.1.4.1.). Beim Fortbewegen im Funknetz wird das Mobilgerät automatisch von Zelle zu Zelle weitergereicht, ohne dass eine Sprach- oder Datenverbindung unterbrochen werden muss (*Handover*, Kap. 2.1.4.3.). Den Umstand, immer mit einer sogenannten „**Heimatzelle**“ (bzw. dem entsprechenden Antennenstandort, der *Basisstation*) eindeutig verbunden zu sein, kann man sich zunutze machen und ihre geographische Abdeckung als Abschätzung für den Standort des Mobilgerätes verwenden.

Diese Methode wird **Cell-ID** (Zellidentifikation) genannt, in verschiedener Literatur findet man auch die Bezeichnungen **Cell of Origin** (COO, Ursprungszelle) oder **Cell Global Identity** (CGI), und sie

ist der „Klassiker“ unter den „*Network-Based*“-Verfahren. Die Abkürzung CGI steht in diesem Zusammenhang auch für *Cell Global Identifier*, eine eindeutige Bezeichnung einer Zelle bestehend aus dem Mobile Country Code (MCC), dem Mobile Network Code (MNC), dem Location Area Code (LAC) sowie dem Cell Identifier (CI), (*Ingensand und Bitzi, 2001; DAFU, 2009*).

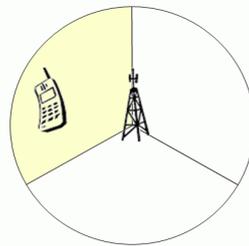


Abb. 3–11.: Methode Cell-ID bei sektorisierter Zelle
(Gutmann, 2007)

In Graphiken werden zellulare Netze gerne in Wabenform (*Abb. 2–23.*) und einzelne Zellen als Kreise bzw. -sektoren dargestellt (*Abb. 3–11.*). In der Realität sind sie jedoch sehr inhomogen, wenn überhaupt nur annähernd kreisförmig und variieren stark in der *Größe*, je nach Art des Mobilfunkes (GSM-900/1800, UMTS, LTE(-A)), geplanter Kapazitäten und tatsächlich eingebuchten Nutzern (*Abb. 2–24., Tab. 2–4.*). Somit treten Größenunterschiede vor allem zwischen städtischen und ländlichen Gebieten sowie verschiedenen lokalen Ballungsräumen, wie z.B. Flughäfen, Bahnhöfen oder Veranstaltungsorten, auf.

Die **Genauigkeit der Methode Cell-ID** wird also in überwiegendem Maße von der Größe der Zelle bzw. des Sektors bestimmt, die zwischen *wenigen Zehnermetern* bei UMTS-Picozellen bis zu *über 30 km* bei GSM-900 betragen kann (*Tab. 2–4.*). Eine Übersicht zu Angaben aus der Literatur vermittelt *Tab. 6–4.*. Bei den Standortangaben selbst gibt es verschiedene Möglichkeiten. Verwendet werden die Lageinformationen der Sender in Breite und Länge, also eine punktförmige Information, da diese meist schon aus der Netzplanung bekannt sind. Eine bessere Schätzung liefert natürlich der tatsächliche Mittelpunkt einer Zelle bzw. eines Sektors. Dieser muss jedoch stets neu berechnet werden, wenn sich das Zellulernetz geändert hat, da diese Örter i.d.R. nicht ident sind mit den Senderstandorten. Als Qualitätsangabe für den Mittelpunktswert kann die durchschnittliche Größe einer Zelle in Form eines Radius bzw. Durchmessers angegeben werden oder besser noch ein abgeschätztes Umrisspolygon.

Bei **UMTS** kommt erschwerend hinzu, dass sich durch die *Zellatmung* die Abgrenzungen der Zellen, und somit auch die Größen, laufend und sehr dynamisch verändern (je nach Nutzeraufkommen und benötigter Bandbreite). Darüber hinaus liegen durch das spezielle *Zellenkonzept* die Flächen der Mikro- und Makrozellen (sowie natürlich der Pikoellen) zu einem Großteil übereinander, so dass je Senderstandort auch stets die jeweilige Zellebene zu identifizieren ist. Noch komplexer werden die Zusammenhänge für die Methode Cell-ID bei den zukünftigen **LTE-Advanced**-Netzen mit den Technologien *CoMP* und *Relaying* (*Abb. 2–14.*). Hiermit können Gesprächs- und Datenverbindungen über mehrere Sende- bzw. Weiterleitungsanlagen gleichzeitig bestehen, um eine entsprechende Bandbreite zu erreichen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Methode Cell-ID vom ursprünglichen Konzept her die *einfachste Technik* zur Standortermittlung im zellularen Mobilfunk darstellt. Sie wird besonders in den starren GSM-Netzen als Einstieg für LBS verwendet (Haselgrübler, 2000), da sie für jedes Mobilgerät ohne Hard- oder Softwareänderung geeignet ist. Nachteile sind die stark variierende Genauigkeit durch die Größe und Form der Zellen sowie die zunehmende Komplexität der Zellenkonzepte in den Netzen der 3. und 4. Generation wie z.B. UMTS und LTE (-Advanced).

3.3.3. Ergänzungen zum Zellenstandort

Da die Angabe des Senderstandortes bzw. des Mittelpunktes einer Zelle auf Grund ihrer Größe und Variabilität in vielen Fällen sehr ungenau ist (*Methode Cell-ID, Kap. 3.3.2.*), versucht man mit einfachen und kostengünstigen Maßnahmen den Aufenthaltsort des Mobilgerätes innerhalb eines Zellbereiches einzugrenzen. Dies kann durch die Verwendung bekannter Netzparameter, wie z.B. **Timing-Advance** (TA) bei GSM, oder zusätzlicher **Signalstärkemessungen** (RSS) am Mobilgerät²⁷ bzw. an den umliegenden Sendeanlagen und daraus *abgeschätzten Entfernungsbereichen* erfolgen. In der *Abb. 3–12.* sieht man eine dieserart entstehende Zone eines Zellsektors. Überlagerungen mehrerer solcher Zonen führen, sowohl bei GSM als auch bei UMTS und LTE, zu einer wesentlichen Einschränkung des möglichen Aufenthaltsortes innerhalb einer Zelle.

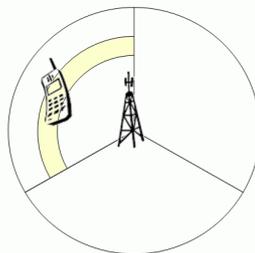


Abb. 3–12.: TA/RSS bei sektorisierter Zelle
(Gutmann, 2007)

All diese Techniken firmieren zusammen unter dem Überbegriff **Enhanced Cell-ID** (E-CID) oder auch **E-CGI** und werden entweder zu den *Network-Based-* oder gelegentlich zu den *Handset-Assisted-*Verfahren gezählt. Signalstärkemessungen selbst sind meist mit der Bezeichnung **RSS** (*Received Signal Strength*) versehen und gelten mitunter auch als eigenständige Methode (Ingensand und Bitzi, 2001; Balbach, 2006).

Geometrisch gesehen laufen diese Methoden hinaus auf ein *Verschneiden von Kreisringen bzw. Kreisringsektoren* und die Berechnung des Mittelpunktes der Schnittfläche²⁸, wobei die Breite eines Ringes bei der TA ca. 550 m beträgt, bei den Signalstärkemessungen ist sie geringer (*Abb. 3–13.*). In ländlichen Gebieten, wo eine Zelle i.A. ein größeres Gebiet abdeckt als in einer Stadt, ermöglichen

²⁷ In GSM-Netzen werden standardmäßig laufend Signalstärkemessungen von erreichbaren umliegenden Sendern durchgeführt, u.a. um den Handover-Mechanismus zu ermöglichen (*Kap. 2.1.4.3.*).

²⁸ Geometrische Überlegungen in diesen Abschnitten werden nur in der Ebene geführt. In Gegenden mit größeren Höhenunterschieden (z.B. Gebirge) ist die Höhenkomponente jedenfalls zu beachten.

diese Ergänzungen zur Cell-ID eine höhere Genauigkeit. In dicht verbautem Gebiet ist die TA wegen der kleinen Zellen fast ausschließlich null, wodurch aus einem Kreissektor kein kleinerer Kreisringsektor entstehen kann.

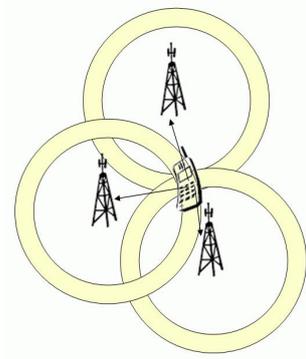


Abb. 3–13.: Verschneidung von Kreisringen (TA/RSS)
(Gutmann, 2007)

3.3.4. Richtungsmessungen zur Ortsbestimmung

Ein schon lange betrachteter Ansatz zur Ortsbestimmung in Mobilfunknetzen bildet die Messung der Richtungen ein- und ausgehender Signale bei den Sendeanlagen bzw. am Mobilgerät selbst. Ursprünglich beschränkte man sich dabei auf die Erfassung der Einfallrichtung der elektromagnetischen Welle an *Antennenfeldern* auf den Basisstationen, wobei hier der Phasenunterschied zwischen den einzelnen Antennenelementen zum Tragen kommt. Neuere Entwicklungen bei der Antennentechnologie mit Richtcharakteristik (in der Literatur bisweilen als *Smart-Antennen* bezeichnet) ermöglichen jedoch auch ein Abschätzen der Richtung ausgehender Signale (Sietmann, 2001; Seow, 2009).

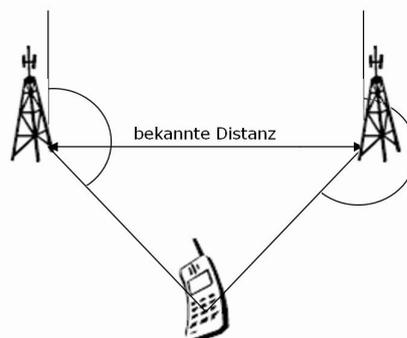


Abb. 3–14.: Ortsbestimmung mittels Richtungserfassung
(Gutmann, 2007)

Bei bekannter Ausrichtung der Antennenfelder und verfügbaren Koordinaten der Empfänger bzw. Sender erhält man somit Azimute, deren Verschnitt (von zumindest zweien) zum gesuchten Standort eines Mobilgerätes führt. Diese Methode wird mit **Angle of Arrival** (AOA, *Ankunftswinkel*) bzw.

Angle of Departure (AOD, *Ausfallswinkel*) bezeichnet, mitunter findet man auch die Begriffe **Direction of Arrival** (DOA) oder **Standlinienverfahren** (*Ingensand und Bitzi, 2001*). Abb. 3–14. zeigt die Minimalkonfiguration zu AOA mit zwei Basisstationen.

Gelingt es Ein- und Ausfallswinkel zu und von weiteren Basisstationen zu bestimmen und ist zusätzlich der Abstand zwischen diesen hinreichend genau bekannt, so lässt sich die **Genauigkeit** eines Standortes noch wesentlich verbessern und kann Werte von kleiner als *100 m* erreichen (Literaturangaben sind in Tab. 6–4. ersichtlich). Da die Methodik in ihrer ursprünglichen Form keine Modifikationen an Mobilgeräten erforderte und diese auch nicht an Messungen sowie Berechnungen beteiligt worden sind, wurde sie zu den *Network-Based*-Verfahren gezählt. Sind Richtantennen auch an den mobilen Geräten vorhanden und nehmen diese am Prozess der Richtungs- bzw. Azimutbestimmungen teil, so ist zumindest von einem *Handset-Assisted*- oder auch *Hybrid*-Verfahren zu sprechen (*Seow, 2009*).

AOA konnte sich bislang als Einzelmethode nicht behaupten, da sie sowohl am Land (zu große Distanzen zwischen den Basisstationen) als auch im städtischen Umfeld (Mehrwegeproblematik) zu fehleranfällig ist und auf Seite der Sendeanlagen hohe Kosten für Antennenfelder verursacht (solche Spezialantennen werden standardmäßig in den Netzen der 2. und 3. Generation noch nicht eingesetzt). Die Perspektive für den Einsatz von Richtungsgrößen in Ortungsprozessen wird sich jedoch mit dem Ausbau von HSPA+ als UMTS-Erweiterung, spätestens aber bei den neuen LTE(-A)-Netzen (*Kap. 2.1.2.4.*), wesentlich ändern, da bei beiden Antennenfelder für den Einsatz von MIMO bereits standardisiert sind. Nichtsdestotrotz gibt es heute bereits Anbieter von Ortsbestimmungstechnologien, die AOA als Teil einer umfangreichen Hybridlösung in ihren Produkten verwenden bzw. verwendet haben (z.B. (*TruePosition, 2010; 2014*)).

3.3.5. Methoden beruhend auf Laufzeitmessungen

Da Mobilfunknetze seit jeher als Kommunikations- und Datenübertragungssysteme mittels unterschiedlicher Funksignale operieren, ist es naheliegend, diese auch für die Messung von Laufzeiten einzusetzen und über Geschwindigkeitsmodelle von elektromagnetischen Wellen in bodennaher Luftschichtung auf entsprechende Distanzen zu schließen. Dies stellt sehr hohe Anforderungen an die **Zeitmessung** und **Synchronisation** im Bereich von mindestens 10^{-7} (*100 ns*), was in etwa einer Strecke von *30 m* entspricht.

Je nach Netz, Konfiguration der beteiligten Einrichtungen (Sende- und Mobilstation, Location Measurement Unit (LMU), Location Server), Laufrichtung und Art der verwendeten Signal-Bursts sowie dem Ort, wo die Zeitnehmung bzw. die Berechnung der Position erfolgt, unterscheidet man mehrere Methoden, die teils den *Network*- und teils den *Handset-Based*-Verfahren zugezählt werden. Manchmal sind gewisse Methoden auch einer dritten (Unter-) Gruppe, den *Handset-Assisted*-Verfahren, zugeordnet. Nicht alle diese Techniken aus der Theorie und Forschung erwiesen sich als praxistauglich. In den USA waren einige Mobilfunkanbieter sogar gezwungen, einen kompletten Technologiewechsel vorzunehmen, da die geforderten Genauigkeiten der FCC zur Standortbestimmung bei E-911 auch unter großen Mühen nicht erreichbar waren (*Kap. 3.1.2., (Williams, 2005; Brimicombe und Li, 2009)*).

Der einfachste und auch älteste Ansatz für Laufzeitmessungen zur Ortsbestimmung im Mobilfunk beruht auf der Zeitnehmung von Signalen, die von der Mobilstation zu den umliegenden Basisstationen gerichtet sind, wobei in einem GSM-Netz die MS mit den erreichbaren BTS standardkonform, zusätzlich zur „Heimatzelle“, in laufendem Kontakt steht (Kap. 2.1.4.3.). Abb. 3–15. zeigt diesen einfachen Fall der *Bestimmung der Ankunftszeiten (Time of Arrival, TOA)* mit drei beteiligten BTS. Eine solche Konstellation wird auch als *Uplink-Verfahren* bezeichnet.

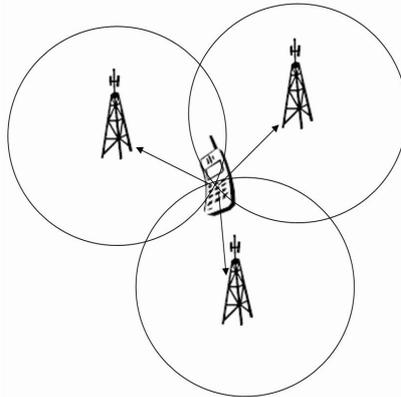


Abb. 3–15.: Messung der Ankunftszeiten (TOA)
(Gutmann, 2007)

Die Hauptaufgabe dieser Methode besteht nun im Abgleich der Sender- (im Mobilteil) mit den Empfängeruhren (in den Basisstationen bzw. LMU). Dazu gibt es unterschiedliche Vorgangsweisen, je nach Anforderung an die Genauigkeit und bestimmten Kosten-Nutzen-Überlegungen. Die *Zeitsynchronisation* zwischen der MS und der Heimatzelle, aber auch zwischen den BTS bzw. LMU untereinander, kann auf einfache Weise mittels gemessener **Rundlaufzeiten** erfolgen. Dies ist sowohl am Mobilgerät als auch im Netz möglich. Hierbei wird die Durchlaufzeit innerhalb einer BTS oder LMU bzw. MS abgeschätzt oder ist vorweg bekannt.

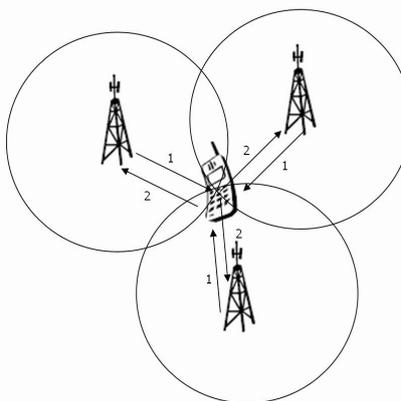


Abb. 3–16.: Messung der Rundlaufzeiten (RTD)
(Gutmann, 2007)

Diese Technik wird **Round Trip Delay (RTD)**, **Round Trip Time (RTT)** oder auch **Round Trip of Flight (RTOF)** genannt und vielfach auch als Standardmethode eingesetzt, um sich Synchronisationen a priori zu ersparen, wie in Abb. 3–16. mit drei BTS gezeigt (Balbach, 2006; Gutmann, 2007).

Hardwaremäßig kann die Zeitnehmung selbst an den Antennen der Basisstationen erfolgen, wenn diese hinsichtlich Signaltechnik und Genauigkeit dazu geeignet sind, oder es werden zusätzliche, dafür optimierte, LMU montiert.

Bei höheren Anforderungen an die Genauigkeit kann ein Uhrenabgleich mittels der **GPS-Systemzeit** erfolgen, auch der Einsatz von **Atomuhren** ist möglich (z.B. liefert ein Rubidium-Oszillator bereits eine Stabilität von 10 ns). Dies kommt in erster Linie für die Synchronisation der beteiligten BTS im Funknetz in Frage (Ingensand und Bitzi, 2001). Ansonst geht der große Vorteil der Methode TOA, jedes beliebige Mobilgerät, auch ältere Modelle, ohne Hard- oder Softwaremodifikation verwenden zu können, verloren.

Meist wird eine Kombination aus GPS-Zeitabgleich, RTD-Messungen und zusätzlichen LMU mit bekannten Standorten, je nach örtlichen Gegebenheiten des Netzes, Kostenüberlegungen oder gesetzlichen Anforderungen, verwendet und die gesuchte Position des Mobilgerätes mittels statistischer Verfahren auf einem Location Server im Netz ermittelt. Demnach werden die Methoden **TOA** und **RTD** auch den *Network-Based-Verfahren* zugeordnet. Bei hohem Synchronisationsaufwand, geringer Mehrwege-Belastung und mehr als drei involvierter Basisstationen können in 3G-Netzen Genauigkeitswerte von bis zu 100 m angeführt werden (Tab. 6–4.).

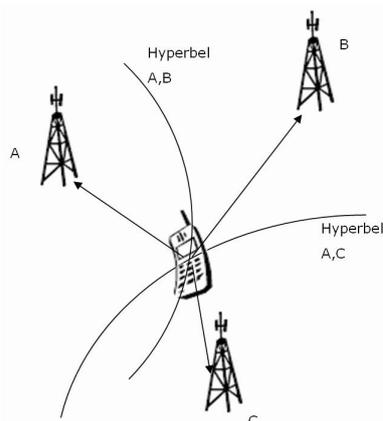


Abb. 3–17.: Bestimmung von Zeitdifferenzen im Uplink (TDOA)
(Gutmann, 2007)

Um die Synchronisation der Mobilgeräte-Uhren mit der Netzzeit zu umgehen und weitere systematische Effekte größtenteils zu eliminieren, werden in einer Weiterentwicklung der Methode TOA die *Differenzen von Laufzeiten* zu Basisstationen bzw. LMU bestimmt. Dies läuft, geometrisch betrachtet, auf ein Verschneiden von Hyperbeln anstatt Kreisbögen hinaus und setzt daher mindestens drei erreichbare Empfänger voraus. Die Laufzeitdifferenzen zu je zwei davon ergeben eine Hyperbel, wie Abb. 3–17. für den einfachsten Fall zeigt. Man spricht bei dieser Methode von **Time Difference of Arrival** (TDOA), bisweilen, um die Richtung der Signale dezidiert anzugeben, von **U(L)-TDOA** (Uplink-TDOA). Somit ist zu erkennen, dass es sich hierbei auch um *Uplink-Verfahren* handelt (TruePosition, 2004).

Leistungsmäßig stellt das Ansetzen von Laufzeitdifferenzen in dieser Uplink-Konstellation bei ähnlichen Netzbedingungen bislang die *genaueste Einzelmethode* unter jenen dar, die auf *Laufzeitmessungen* beruhen, und erreicht in 3G-Netzen Werte bis zu 20 m (Tab. 6–4., (Hofmann-Wellenhof et al.,

2003; Brimicombe und Li, 2009)). Die laufende Entwicklung auf dem Gebiet der hochgenauen Uhrensynchronisation in verteilten Netzen²⁹ lässt erwarten, dass in Mobilfunknetzen der 4. Generation ein Genauigkeitsbereich von 10 m unter guten Umgebungsbedingungen erreichbar ist und dies mit niedrigeren Kosten. Ermöglicht werden diese Werte durch eine Verbesserung der eingesetzten Protokolle, Schnittstellen und Standardisierungen sowie der verwendeten Hardware.

In umgekehrter Richtung, also als *Downlink*-Verfahren, wird das Verwenden von Laufzeitdifferenzen in GSM-Netzen **Enhanced Observed Time Difference** (E-OTD) genannt. Dabei müssen die Mobilgeräte zumindest mit einer speziellen Software erweitert werden, um eine Zeitnehmung durchführen zu können, Differenzen zu bilden und eventuell sogar die Position zu berechnen, falls dies nicht auf einem Location Server im Netz vorgenommen wird (Gutmann, 2007; Brimicombe und Li, 2009). Abb. 3–18. zeigt die Situation wieder mit einer Minimalkonfiguration von drei beteiligten Basisstationen.

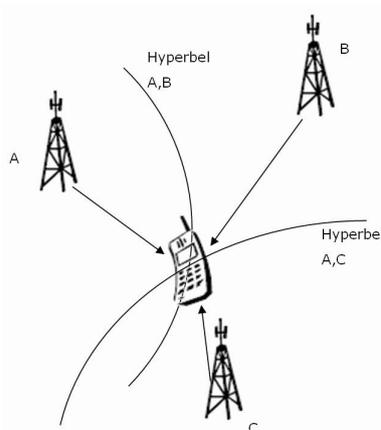


Abb. 3–18.: Bestimmung von Zeitdifferenzen im Downlink (E-OTD)
(Gutmann, 2007)

Größter *Nachteil* dieser Methode ist die zwingende Erweiterung der mobilen Geräte, die von Modell zu Modell auch auf Grund von verschiedenen Hardwarevoraussetzungen anders ausfällt und somit auch bei der Zeitnehmung unterschiedliche Genauigkeiten hervorbringt. Geräte ab einem gewissen Alter lassen sich mitunter für E-OTD überhaupt nicht mehr adaptieren. In den USA mussten Mobilfunkanbieter diese ursprünglich sehr hoffnungsvolle und zu den *Handset-Based*-Verfahren zählende Technik, die für GSM sogar schon standardisiert worden war, durch andere Methoden ersetzen (Uplink-Verfahren oder A-GPS), da die geforderten Genauigkeiten der FCC für E-911 hiermit nicht zu erreichen waren (Kap. 3.1.2., Kap. 5.1., Tab. 6–4.). Dies hatte auch zur Folge, dass gewisse Anbieter und ihre Systeme vom Markt wieder verschwanden (z.B. das Cambridge Positioning System (CPS, 2002)).

Für 3 G-Netze nach UMTS-Standard wurden weiters noch eigene Methoden entwickelt, die den *Downlink*-Verfahren zuzuordnen sind und mit **OTDOA** (*Observed Time Difference of Arrival*) bezeichnet werden. Sinnvoll einsetzen lässt sich OTDOA jedoch nur mit speziellen Erweiterungen wie **Idle Period Downlink** (IPDL), **Time Aligned IPDL** (TA-IPDL) oder **Cumulativ Virtual Blanking**

²⁹ Es gelingt heute bereits eine Synchronisation im Bereich von 100 ns , z.B. ausführlich diskutiert in einer Arbeit von (Horauer, 2004).

(CVB). Diese sind notwendig geworden, da UMTS-Netze dahin gehend optimiert werden, dass die Verbindung zwischen Heimatzelle und Mobilgerät jenen von den benachbarten Zellen leistungsmäßig bei weitem überlegen ist, was auch als *Nah-Fern-Effekt* bezeichnet wird. Dies geschieht, um Interferenzen großteils zu unterbinden und somit die Qualität einer aktiven Verbindung zu verbessern (IST, 2001a; Wang, S. et al., 2008).

Nachteil einer solchen Optimierung für die Kommunikation bzw. Datenübertragung bei UMTS ist der sehr schwache Empfang von umliegenden Zellen für Laufzeitmessungen, was mit den Techniken *IPDL* und *CVB* verbessert werden konnte. Nachdem jedoch in den USA im Vergleich zu anderen Mobilfunktechnologien nur sehr wenige UMTS-Netze entstanden sind und auch E-OTD als eine Ortsbestimmungstechnik im Downlink ersetzt werden musste, ist es unwahrscheinlich, dass die Methode OTDOA in der Praxis eine größere Bedeutung erlangen wird.

Durch die Vielzahl an Mobilfunkanbieter in den USA und den technischen Unterschieden in den Netzen gibt es noch einige weitere auf Laufzeitmessung beruhende Ortsbestimmungsmethoden, die jedoch nicht eine ähnlich wichtige Rolle spielen, wie die oben beschriebenen. Mit dem Übergang auf Netze der 3. und 4. Generation, allen voran LTE(-A), das sich auch im amerikanischen Raum zusehends verbreitet, werden diese sukzessive vom Markt verschwinden. Erwähnt werden sollen die Methoden **Advanced Forward Link Trilateration** (A-FLT) und **Enhanced Forward Link Trilateration** (E-FLT).

A-FLT zählt zu den *Downlink*-Verfahren, funktioniert vom Prinzip ähnlich wie E-OTD, jedoch nur in synchronisierten CDMA-Netzen nach IS-95 (Abb. 2–3. und Abb. 2–5.). Es wird meist in Kombination mit A-GPS eingesetzt, da bei beiden jedenfalls eine Erweiterung des Mobilteils erforderlich ist. E-FLT gilt als *Uplink*-Verfahren ähnlich TOA, verwendet bestehende Signale in CDMA-Netzen, kann mit Standard-Mobilgeräten betrieben werden und ist vielfach eine Ersatzmethode, falls A-FLT und A-GPS nicht eingesetzt werden können (Wang, S. et al., 2008).

3.3.6. Einbeziehung eines GNSS

Der Einsatz von **globalen Satellitennavigationssystemen** (GNSS, Kap. 2.2.) zur Lokalisierung von mobilen Geräten hat im Vergleich mit den anderen vorgestellten Methoden ein noch viel größeres Potential für die Zukunft. Einerseits ist die Technologie, neben dem militärischen Bereich, seit über zwanzig Jahren durch Aufgaben aus der Navigation, Geodäsie und den astronomischen Verfahren gut eingeführt und weiterentwickelt, andererseits entstehen, wenn auch bisweilen mit großen Verzögerungen, laufend neue Systeme wie **Compass/Beidou** (China), **Galileo** (Europa) oder **GPS III** (USA). Die fortschreitende Miniaturisierung in der Hardware sowie immense Entwicklungen auf dem Gebiet der digitalen Nachrichtentechnik erlauben mittlerweile eine sehr kostengünstige und effektive Implementierung in Mobilgeräten wie Handys, Smartphones, Tablets, Net- und Notebooks, Uhren usw..

Diese laufende Verbesserung in der Empfängertechnologie für Satellitensignale ermöglicht heute bereits den Einsatz von einfachen **C/A-Code-Geräten** (*Einfrequenz-Empfänger*) sowohl innerhalb von Gebäuden als auch unter größeren Abschattungsbedingungen, wie in einem städtisch dicht verbauten Gebiet (wenn auch bislang noch mit entsprechenden Einschränkungen). Durch den Einsatz

der neuen Signale L2C und L5C im zivilen Bereich von GPS II (Tab. 2–5.) sowie den Aufbau von Galileo werden die Möglichkeiten für die Ortsbestimmung und Navigation in den kommenden Jahren kontinuierlich steigen.

Wichtige Grundlagen zu Satellitensystemen sind anhand von NAVSTAR-GPS in Kap. 2.2. erörtert, Testmessungen mit zwei Handempfängern unterschiedlicher Generation in Kap. 4.3. analysiert und Ergebnisse zu Feldversuchen und Simulationen mit A-GPS aus der Literatur in Kap. 5.2. beschrieben. Die Darstellungen in diesem Teil beschränken sich auf die Prinzipien von **Assisted GPS**, mittlerweile auch mit **A-GNSS** bezeichnet (wenn nicht direkt auf das NAVSTAR-GPS Bezug genommen wird), und der Verwendung in zellularen Mobilfunknetzen. Abb. 3–19. zeigt stark vereinfacht die Zusammenhänge eines solchen A-GNSS.



Abb. 3–19.: A-GNSS im Mobilfunknetz (Eissfeller et al., 2005)

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Signalen der Satelliten- und jenen der Mobilfunknetze (ab der 2. Generation) ist, dass Erstere ausschließlich für die Navigation im Freien entwickelt wurden (z.B. die technische Konzeption zu GPS aus den frühen 70er-Jahren (Kap. 2.2.1.)), während GSM-Funk von Anfang an für die Kommunikation auch innerhalb von Gebäuden ausgelegt war. Obwohl die bereits sehr niedrigen Pegel der GPS-Signale beim Eintritt in Bauwerke, abhängig vom jeweiligen Material, nochmals eine Dämpfung von 20-30 dB und mehr erfahren (was einem Faktor 100-1000 entspricht), so ist dennoch, ein entsprechender Empfänger vorausgesetzt, ein messbares Signal vorhanden (Eissfeller et al., 2005). Die entscheidende Aufgabe besteht nun darin, Empfangstechnologien zu finden, die in solchen und ähnlichen Situationen eine Positionslösung hervorbringen und dies in wesentlich kürzerer Zeit, als es herkömmliche, autarke GPS-Geräte vermögen (Kap. 4.3.1.).

Die Problemlösung wird gleichzeitig auf mehreren Wegen beschritten. Einerseits durch eine massive *Steigerung der Empfangsempfindlichkeit* mittels Erhöhung der Anzahl parallel arbeitender Korrelatoren und spezieller Techniken bei der Satellitenakquisition. Andererseits durch „assistierende Daten“, die dem Empfänger über das Mobilfunknetz, heute meist eine geschützte Datenverbindung in das Internet, vorweg zur Verfügung stehen. Ersteres wird **High Sensitivity GPS** (HS-GPS) genannt und verfügt im Gegensatz zu Standardempfängern mit weniger als 100 Korrelatoren über mehrerer 10.000. Dies reduziert darüber hinaus auch die Akquisitionszeit beträchtlich. Ab einer Dämpfung von ca. 25 dB ist eine Akquisition ohne Assistenzdaten auch mit HS-Empfängern kaum noch möglich (Bauer, 2011). Hier werden zukünftige Entwicklungen bei Galileo und GPS III entscheidende Verbesserungen bringen, da beide Systeme im zivilen Bereich mit einer stärkeren Abstrahlung operieren.

Um Größenordnungen zu erkennen, sei hier ein Beispiel aus (*Eissfeller et al., 2005*) zusammenfassend angeführt. Unter durchschnittlichen Bedingungen in einem Gebäudeinneren benötigt ein HS-Empfänger, ausgestattet mit 16.000 Korrelatoren und unter *Zuhilfenahme von Assistenzdaten*, für die Akquisition von 4 Satelliten lediglich ca. *1 Sek.*, während ein Standardempfänger mit 36 Korrelatoren in derselben Situation auf beträchtliche *7 Min. 35 Sek.* kommt. Der Vergleich im Freien wiederum liefert Werte von *0,04* im Vergleich zu *18,2 Sek.*. Beides bedeutet bereits eine enorme Steigerung. Es wird jedoch laufend weiter entwickelt und heute sind bereits Chipsätze mit mehr als 200.000 Korrelatoren am Markt (z.B. SiRFstar III-V, (*Klaß, 2006; Wikipedia, 2014t*)).

Je nachdem ob ein A-GNSS Satellitenempfänger in einem Mobilgerät *MS-based* oder *MS-assisted* verwendet wird, bekommt er von einem *Location Server (LS)* über das Mobilfunknetz eine bestimmte Auswahl von **Assistenzdaten** zur Verfügung gestellt. Ein LS kann diese Daten von einem Satelliten-Referenzempfänger, einem ganzen Referenznetz und/oder bestimmten wissenschaftlichen Serviceanbietern wie dem IGS (*International GNSS Services, (IGS, 2014)*) ableiten:

- näherungsweise Standort (z.B. ermittelt durch die Methode Cell-ID)
- Almanach (Bahndaten der Satelliten in vereinfachter Form)
- Ephemeriden (genaue Bahndaten)
- Dopplerinformationen
- GNSS-Zeiten (z.B. GPS-Systemzeit)
- Koordinaten der Referenzstation(en)
- Korrekturdaten für differentielles GNSS

Im ersten Fall (*MS-based*) berechnet eine spezielle Software *im Mobilgerät* die Positionslösungen und schickt die Ergebnisse, wenn gewünscht, z.B. zu einer LBS-Applikation im Internet oder bei einem **Notruf** an eine dezidierte Leitstelle (E-911 in den USA (*Kap. 3.1.2.*) bzw. eCall in Europa (*Kap. 3.1.4.*)). Im zweiten Fall (*MS-assisted*) werden die ermittelten Pseudostrecken oder sogar nur die digitalisierten Empfangssequenzen unmittelbar zurück an einen LS gesendet und alle nachfolgenden Prozesse, insbesondere sämtliche Berechnungen, erfolgen auf diesem (u.a. (*Wunderlich et al., 2006; Su, 2007*)).

Im Detail ist die technische Ausführung von A-GNSS von Anbieter zu Anbieter sehr verschieden und oft auch Gegenstand von zahlreichen Patenten. *Neuere Entwicklungen* kombinieren A-GNSS- und TDOA-Messungen auf einem LS (z.B. (*TruePosition, 2014*), *Kap. 3.3.5.*). Wenn zukünftig auch Winkelinformationen (AOA, AOD) von Antennenfeldern und Richtantennen zur Verfügung stehen, so werden auch diese in die Berechnungen mit einbezogen. Man spricht hierbei dann auch von einer „**Multihybrid-Methodik**“. A-GPS als Einzelmethode wurde ursprünglich zu den *Handset-Based-Verfahren* gezählt.

GPS mit Assistenzdaten erzielt, im Vergleich zu autarken Satellitenempfängern, in jedem Fall schneller und mit höherer Genauigkeit Positionslösungen. Im Freien und ohne Abschattungsbedingungen sind durchaus Genauigkeiten im Bereich von $\pm 3 m$ (1σ) möglich und dies nur unter Verwendung des zivilen C/A-Codes (*Brimicombe und Li, 2009*), *Tab. 6–4.*).

4. Koordinatensysteme, Fehlermaße und GPS-Messungen

Dieses Kapitel soll erläutern, welche **Koordinatensysteme** samt zugehörigen **Transformationen** verwendet werden als Voraussetzung für jede Standortfestlegung eines *Location Based Services* und weiters jene **Genauigkeitsmaße** beschreiben, die die Güte einer Ortsbestimmung für diese LBS wiedergeben. Um verschiedene Maße an geeignetem Zahlenmaterial unverfälscht veranschaulichen zu können, wurden eigene **GPS-Testmessungen** vorgenommen, in das österreichische Landeskoordinatensystem transformiert und samt unterschiedlicher Fehlermaße auf einer digitalen Karte visualisiert³⁰. Gleichzeitig geben diese Werte einen Einblick ob und wie sich autarkes GPS auf C/A-Code-Basis für die Ortsbestimmung in einem innerstädtischen Gebiet dieser Art eignet.

4.1. Koordinaten und ihre Systeme sowie zugehörige Transformationen

In den *Kap. 2.2.3.* und *Kap. 2.2.4.* wird beschrieben und abgeschätzt, mit welchen Methoden und Genauigkeiten man heute bereits Ortsbestimmung mit GPS als Beispiel für ein GNSS betreiben kann und im nächsten *Kap. 4.2.* ist zu erfahren, wie unterschiedliche Fehlermaße diesbezüglich zu beurteilen sind. Dieses Kapitel soll nun überblicksweise Auskunft geben, wie *verschiedene Positionsangaben* in Form von Koordinaten, ermittelt mit GPS oder Mobilfunkmethoden, *ineinander übergeführt* werden können. Darüber hinaus wird auch ein Bezug zu den üblichen Ortsangaben hergestellt, wie sie in (amtlichen) Karten und Plänen vorgenommen werden.

Das Gebiet der **Koordinaten- und Bezugssysteme** ist ein sehr komplexes. Darum beschränken sich die Erörterungen hier auf jenen Bereich, der für die Problematiken der Ortsbestimmungen in dieser Arbeit von Bedeutung ist. Der unweigerliche Zusammenhang mit den *Zeit- und Höhensystemen* (Schweremodelle) wird absichtlich ausgespart, gegebenenfalls gibt es einen Verweis auf einschlägige Literatur.

Um ein Bewusstsein der Problemstellung von Koordinaten in der (globalen) Ortsbestimmung³¹ zu bekommen, sei festgehalten, dass es sich hierbei um *drei völlig verschiedene Systeme* handelt:

³⁰ Diese *digitale Mehrzweckkarte* (MZK) in einem georeferenzierten Rasterformat wurde von der MA 41 Stadtvermessung des Magistrates der Stadt Wien zur Verfügung gestellt.

³¹ Die Betrachtungen zur Ortsbestimmung in dieser Arbeit sind eingeschränkt auf bestimmte Methoden, die speziell für LBS eingesetzt werden.

- Beschreibung der Örter von Satelliten in ihren Bahnen um die Erde
- Positionsangaben abgeleitet mit Hilfe von GNSS und Mobilfunk
- Koordinaten der amtlichen Landesvermessungen (z.B. im Österreichischen Kataster)

Im Zusammenhang mit Ortsangaben und Koordinaten werden im deutschen Sprachgebrauch verschiedene Begriffe verwendet, wenn es um das zugeordnete System geht, in dem sie beschrieben werden: *Koordinatensysteme*, *Bezugs-* oder *Referenzsysteme*, *Bezugs-* oder *Referenzrahmen* und das *geodätische Datum*.

Der Begriff „**Koordinatensystem**“ (KS) ist der neutralste von allen und dient (im einfachsten Fall) der eindeutigen Beschreibung eines Punktes durch Zahlenwerte im Raum oder in der Ebene des Systems (z.B. ebenes kartesisches KS zur Darstellung von 2D-Kurven). Dabei wird nicht festgehalten, wo sich dieses KS mit seinen Punkten zu einem bestimmten Zeitpunkt eigentlich befindet.

Die Begriffe „**Bezugs-**“ und „**Referenz-**“ werden hier als gleichwertig betrachtet, es ist aber nach (Weber et al., 1995) zu unterscheiden zwischen **Bezugssystem** und **Bezugsrahmen**. Während das *Bezugssystem* die theoretische, ideale Definition eines KS im Raum bezeichnet, versteht man unter *Bezugsrahmen* die Realisierung eines solchen Systems z.B. in Form von Koordinaten fest installierter Beobachtungsstationen. So können für ein und dasselbe Bezugssystem durchaus verschiedene Bezugsrahmen nebeneinander existieren. Ein Bezugssystem ist nicht notwendigerweise allein durch die Festlegung seiner Koordinatenachsen definiert, sondern kann zusätzliche Richtlinien (Modelle) und Datensätze zur Reduktion von Messgrößen oder zur zeitlichen Transformation des Systems umfassen.

Der Begriff des **geodätischen Datums** wird sowohl in einem engeren als auch in einem weiteren Sinne verwendet. I.A. beschreibt es die Lage eines Bezugssystems zu einem übergeordneten System, wobei meist noch ein Ellipsoid, manchmal sogar mit einem Schweremodell und einer Rotationsgeschwindigkeit der Erde, mit in die Definition aufgenommen wird. Details findet man u.a. in (Seeber, 1989; 1993; 2003).

Die nächsten Abschnitte beschreiben nun die einzelnen Systeme, teilweise auch mit ihren mathematischen Beziehungen und Transformationen, wobei auf folgende Schwerpunkte eingegangen wird:

- **astronomische** (inertiale) und **terrestrische KS** (Definition und Fixierung im Raum)
- **globale** und **lokale KS** (Lagerung der Abbildungsfläche)
- **kartesische** und **geographische KS** (Definition der Abbildungsfläche)
- **räumliche** und **ebene KS** (Definition der Abbildungsvorschrift)

4.1.1. Astronomische und terrestrische KS

Satellitenörter in ihren *ellipsenförmigen Bahnen um die Erde* werden klassischerweise nach den Keplerschen Gesetzen und den Newtonschen Bewegungsgleichungen in **inertialen** (raumfesten) **Systemen** berechnet. In solchen sind die Trägheitsgesetze uneingeschränkt gültig, aber sowohl die Bewegung der Erde um die Sonne als auch des ganzen Sonnensystems ist weder linear noch konstant.

Darum spricht man in diesem Zusammenhang nach (Weber *et al.*, 1995) auch von sogenannten **quasi-inertialen Systemen**.

Als ein solches wird das **Conventional Inertial System (CIS)** verwendet, dessen Ursprung im Massenmittelpunkt der Erde liegt und dessen Z-Achse definitionsgemäß in Richtung der mittleren Drehimpulsachse der Erde (*Celestial Ephemeris Pole, CEP*) zu einer bestimmten Standardepoche weist. Die X-Achse steht senkrecht zur Z-Achse und zeigt zum zugehörigen Frühlingspunkt. Dieser liegt in Richtung der Schnittlinie der Äquatorebene mit der Ebene der Ekliptik. Als Ekliptik bezeichnet man die Ebene in der sich die Erde um die Sonne bewegt. Die Y-Achse ergänzt das ganze zu einem kartesischen Rechtssystem.

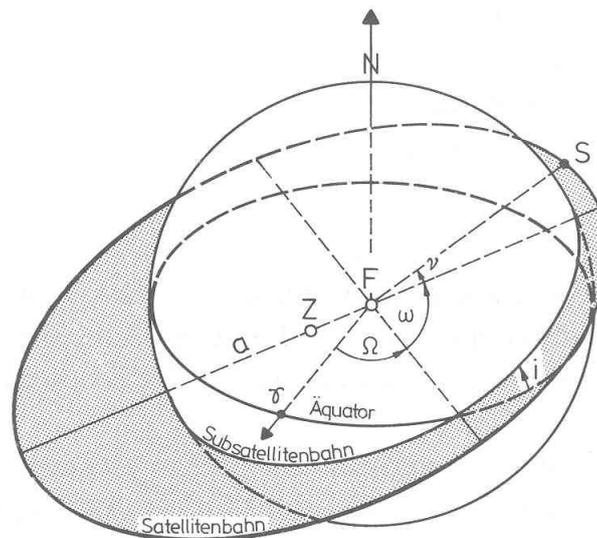


Abb. 4-1.: CIS mit Satellitenbahn (Kahmen, 1997)

Abb. 4-1. zeigt diese (vereinfachten) Zusammenhänge. Der Erdmittelpunkt und gleichzeitig Brennpunkt der Bahnellipse ist mit F , der Ellipsenmittelpunkt mit Z , der Satellitenort mit S und der Frühlingspunkt mit γ bezeichnet. Die sechs Bahnparameter a , e , i , Ω , ω , v beschreiben nun eindeutig den ungestörten Ort des Satelliten im CIS. Weitere Ausführungen dazu findet man z.B. in (Bauer, 1997; 2003; 2011).

Für *Ortsbestimmungen* und zur Lösung von *Navigations-* sowie *Vermessungsaufgaben auf der Erde* sind astronomische Koordinaten nicht unmittelbar geeignet, da in solchen raumfesten Systemen Punkte auf der Erdoberfläche wegen der Erdrotation zeitabhängig ständig andere Koordinaten besitzen. Daher bedient man sich dafür anstatt des CIS **globaler terrestrischer Bezugssysteme**, die geozentrisch mit dem Erdkörper mitrotieren und deren Ursprung sich im Massenmittelpunkt der Erde, einschließlich Ozeane und Atmosphäre, befindet (u.a. (Weber *et al.*, 1995)).

Als ein solches wird heute das **Conventional Terrestrial System (CTS)** verwendet, dessen Z-Achse definitionsgemäß in Richtung des *Conventional Terrestrial Pole (CTP)* weist und dessen XZ-Ebene durch eine Längenkongvention (beinhaltet den mittleren Meridian von Greenwich) festgelegt ist. Die Y-Achse ergänzt das ganze wiederum zu einem kartesischen Rechtssystem (Abb. 4-2.). Der CTP repräsentiert genähert die mittlere Position des CEP über eine vereinbarte Zeitdauer von mehreren Jahren.

Der **Übergang** vom *inertialen System CIS* in das *globale erdfeste Referenzsystem CTS* zu einem bestimmten Zeitpunkt t erfolgt über *mehrere Transformationen*, die im Wesentlichen die Polbewegung, die Erdrotation, die Präzession und Nutation und eine Vereinbarung über die Zeit mit Hilfe der Internationalen Atomzeit beinhalten. Details hierzu findet man u.a. in (Seeber, 1989; 1993; 2003) und mit erweiterten Ansätzen in (Torge und Müller, 2012).

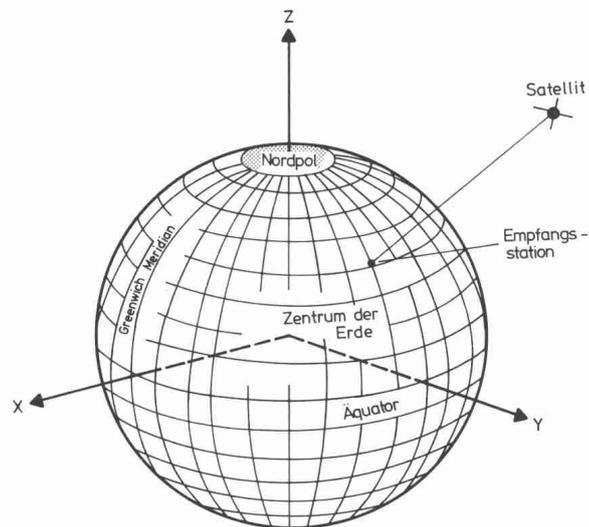


Abb. 4–2.: CTS für Positionsbestimmung mit Satelliten (Kahmen, 1997)

Globale terrestrische Bezugsrahmen sind nun Realisierungen des CTS in Form von *räumlichen Koordinatensätzen* eines Netzes von Beobachtungsstationen, die ihre Position mittels VLBI (Very Long Baseline Interferometrie), SLR (Satellite Laser Ranging), GNSS und anderer Raummesstechniken ableiten (Campell, 2000). Im Folgenden seien einige Beispiele näher erläutert, wobei anzumerken ist, dass alle von ihrer Definition als CTS gleich sind, sich durch die unterschiedlichen Realisierungen aber Differenzen in der Genauigkeit und im Schwerpunkt der geographischen Abdeckung ergeben:

- World Geodetic System 1984 (**WGS-84**)
- IERS Terrestrial Reference Frame (**ITRF**)
- European Terrestrial Reference Frame (**ETRF**)
- Austrian Geodynamic Reference Frame (**AGREF**)

Das **WGS-84** ist ein vom amerikanischen Verteidigungsministerium veröffentlichtes System zur Beschreibung der Bahndaten der GPS-Satelliten (Kap. 2.2.2.). Es setzt sich aus einem kartesischen KS, einem zugeordneten mittleren Erdellipsoid und einem Schwerefeldmodell der Erde zusammen. Außerdem werden noch der Wert für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation festgelegt. Bei der Definition des *zugeordneten Ellipsoides* wurden die Werte des *Geodetic Reference Systems 1980 (GRS-80)* übernommen (Tab. 4–1.).

Die im GPS-Datensignal mitgesendeten Satellitenpositionen (*Broadcast-Ephemeriden*, Kap. 2.2.2.1.) sind im WGS-84 berechnet und lassen sich direkt im Empfänger oder in einer separaten Auswertesoftware verarbeiten. Alle Echtzeitanwendungen in der Navigation und Ortung, die auf GPS beruhen,

sind daher an dieses System gebunden und ermitteln ihre Positionen (Breite, Länge und ellipsoidische Höhe) primär ebenfalls in diesem KS.

Parameter	Bezeichnung	Wert
große Halbachse	a	6 378 137,000 m
Abplattung	f	1/298,257 223 563
Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation	ω_e	$7,292\,115 \cdot 10^{-5}$ rad s ⁻¹
geozentrische Gravitationskonstante	GM	$3\,986\,004,418 \cdot 10^8$ m ³ s ⁻²
zonaler Koeffizient 2. Grades	$C_{2,0}$	$-484,166\,85 \cdot 10^{-6}$

Tab. 4-1.: Parameter für das WGS-84
(Seeber, 1989; Hofmann-Wellenhof et al., 2008)

Da sich die Realisierung des WGS-84 ursprünglich nur auf die Koordinaten von fünf Monitorstationen stützte (Kap. 2.2.2.2.), stimmte es mit einem *bestmöglichen Bezugsrahmen* (ITRF) nur annähernd überein. Die Abweichungen betragen anfänglich etwa *einen Meter* (Bauer, 1997), wurden jedoch laufend durch Anpassungen an den ITRF verbessert (Höggerl et al., 2002). So kommen sukzessive genauere Realisierungen hervor, die zur Unterscheidung die GPS-Wochenummer als Zusatz erhalten. WGS-84 (G730) seit 1994, (G873) seit 1996 (bei dem die Abweichungen schon < 10 cm sind (Bauer, 2003)) und (G1150) mit einer Übereinstimmung zum ITRF 2005 von etwa 1 cm (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Der *Internationale Erdrotationsdienst* (heute bezeichnet mit: *International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS*)³² koordiniert seit 1988 die Entwicklung hochgenauer *terrestrischer Referenzrahmen*. Durch Messungen mit verschiedenen Raumtechniken (z.B. neben GNSS auch VLBI und SLR) in einem weltweiten Netz von heute bereits über 250 Fundamentalstationen werden deren Koordinaten jährlich neu bestimmt und realisieren den **IERS Terrestrial Reference Frame (ITRF)**.

Aufgrund der sich ständig ändernden Koordinaten (die eurasische Platte bewegt sich z.B. nach (Weber et al., 1995) um bis zu 3 cm/Jahr in Richtung NO) werden die berechneten Stationsätze mit einer *Jahreskennung* versehen und man spricht wegen der Zeitabhängigkeit auch von *Epochen*. Z.B. bezieht sich der ITRF 2000 Koordinatenrahmen auf die Ausgangsepoche $1997,0$. Die Jahreszahl des Rahmens bezeichnet hierbei jenen Zeitraum, dessen Beobachtungen noch vollinhaltlich in der Lösung berücksichtigt wurden. Als *Referenzellipsoid* für den ITRF wird ebenfalls das des *GRS-80* verwendet, womit eine Konsistenz zum WGS-84 gegeben ist und ITRF-Koordinaten der entsprechenden Epoche bei GPS-Messungen als Anschluss unmittelbar genutzt werden können (Bauer, 1997).

Um ein für Europa *zeitlich invariantes Referenzsystem* zu erhalten, wurde 1990 beschlossen auf dem stabilen Teil der eurasischen Platte den Datensatz der europäischen ITRF-Stationen zur Epoche $1989,0$ festzuhalten und mit **European Terrestrial Reference Frame 1989 (ETRF 89)**

³² Offizielle Internetseite: www.iers.org.

als Realisierung eines **ETRS 89** zu bezeichnen (*Weber et al., 1995*). Demnach ist ETRF 89 ein Teilnetz der globalen Lösung ITRF 89.

Im Zuge weiterer Verdichtungen entstanden und entstehen *Referenzrahmen auf nationaler Ebene*, z.B. in Deutschland der **Deutsche Referenzrahmen (DREF)** und in Österreich der **Austrian Geodynamic Reference Frame (AGREF)**. Letzterer wurde initiiert von der Abteilung Satellitengeodäsie des Institutes für Weltraumforschung der ÖAW³³ und gemeinsam mit dem BEV³⁴ und der TU Graz in den Jahren 1990-1995 realisiert. **AGREF** ist ein aus 185 Punkten bestehendes hochpräzises *geodynamisches GPS-Netz* und dient als Grundlage zur Qualitätssteigerung des Festpunktfeldes für die Landesvermessung und den Kataster. Für die Genauigkeit wurden *3 mm* in der Lage und *5 mm* in der Höhe angegeben (*BEV, 2001a*).

Heute wird das in Österreich vom BEV zur Verfügung gestellte *nationale 3D-Bezugssystem* mit **ETRS 89 / ETRF 2000 Austria 2002,45** bezeichnet. Diese Lösung wurde als eine dem internationalen Standard entsprechende Realisierung von ETRS 89 akzeptiert und durch die EUREF in der Resolution 1 aus 2003 bestätigt³⁵. Hervorgegangen ist dieses österreichische System aus einer Weiterentwicklung des AGREF unter Einbeziehung des **AREF** (Austrian Reference Frame) und des **TIREF** (Tyrolean Reference Frame) und führte zu einem modernen und international anerkannten *permanenten Satellitenreferenzdienst* namens **APOS** (Austrian Positioning Service). Zusammen mit **AMON** (Austrian Monitoring Network) liefert APOS eine homogene und flächendeckende Koordinatenbasis, die auch gegenüber allen Nachbarländern eine eindeutige Konsistenz gewährt (*Höggerl et al., 2002; Titz et al., 2010*).

4.1.2. Globale und lokale KS

Nachdem sich der letzte Abschnitt mit jüngeren, ausschließlich globalen, KS auseinandergesetzt hat, soll in diesem eingegangen werden auf die klassischen **Landesvermessungssysteme**, die in der Regel mit den damaligen Methoden (teilweise zurückgehend ins 19. Jhdt.) lokal in der jeweiligen Nation gelagert wurden. Weiters wird beschrieben, wie man zwischen globalen und lokalen Systemen transformieren kann.

Der Aufbau der Triangulierungsnetze in den einzelnen Ländern erfolgte, vereinfacht betrachtet, meist ausgehend von einem Zentralpunkt durch die klassische Netzausbreitung und -verdichtung auf einem **lokalen Referenzellipsoid**. Entscheidend war dabei stets die *Lagerung* dieses Ellipsoids gegenüber dem gesamten Erdkörper (*Geoid*), da man damals ohne Satellitentechniken noch keinen Zugriff auf den Schwerpunkt der Erde hatte (u.a. (*Bauer, 1997; 2003; 2011*)). Nach Wahl des Zentralpunktes (auch *Fundamentalpunkt* genannt), möglichst in der Mitte des Gesamtnetzes, wurden in diesem die *astronomische Breite* und *Länge* sowie das *Azimut* zu einem zweiten terrestrischen Punkt möglichst genau bestimmt und direkt als ellipsoidische Koordinaten (*Kap. 4.1.3.*) übernommen. Des Weiteren

³³ Österreichische Akademie der Wissenschaften

³⁴ (Österreichisches) Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

³⁵ Im Jahre 2003 wurde der EUREF (Reference Frame Subcommittee for Europe / IAG Commission I) eine Koordinatenlösung für 11 Punkte in Österreich (10 Permanentstationen und 1 EPOCHENstation) für die GPS-Woche 1176 (Juni 2002) vorgelegt (*Titz et al., 2010*).

mussten die *Dimensionen des Ellipsoides* festgelegt und der *Netzmaßstab* über mindestens eine genau bestimmte Basisstrecke in der Nähe des Fundamentalpunktes definiert werden.

Die traditionellen Landesvermessungssysteme sind also ebenfalls *erdfeste* (terrestrische) *Bezugssysteme*, jedoch lokal gelagert, mit einer Verschiebung des Ursprungs gegenüber dem Erdschwerpunkt und kleinen Verdrehungen der Achsen zu den CTS-Achsen. Für das **österreichische Gebrauchssystem** des **MGI** (*Militärgeographisches Institut*), das seinerzeit für das Gebiet der Monarchie eingerichtet wurde und noch heute das *offizielle System der Landesvermessung*³⁶ und somit Grundlage aller auf dem Festpunktfeld beruhenden Vermessungen sowie des Katasters mit sämtlichen Grenzfestlegungen ist (u.a. (*Titz et al., 2010*)), seien die Eckdaten kurz beschrieben.

Das **System des MGI** wurde im *Fundamentalpunkt Hermannskogel* (Habsburgwarte, höchste Erhebung im Wienerwald, nordwestlich des Cobenzl) gelagert und mit dem *Azimet Hermannskogel – Hundsheimer Berg* (südwestlich von Hainburg) orientiert. Als *Bezugsellipsoid* diente das von *Bessel 1841* mit den Formparametern (u.a. (*Bauer, 2003*)):

$$\begin{aligned} a &= 6\,377\,397,155 \text{ m} && \text{(große Halbachse)} \\ e^2 &= 6,674\,372\,231 \cdot 10^{-3} \text{ bzw. } f = 1/299,152\,812\,545 && \text{(1. Exzentrizität, Abplattung)} \end{aligned}$$

Für die **Transformation zwischen globalen und lokalen KS** gibt es nun mehrere Möglichkeiten mit *unterschiedlicher Genauigkeit*, wobei diese mit der Anzahl der Parameter steigt (*Imrek, 1999*). Die besten Ergebnisse erhält man mit einer (überbestimmten) **räumlichen Ähnlichkeitstransformation** (auch *Helmerttransformation* genannt) unter Verwendung von *7 Parametern*: 3 Verschiebungen, 3 Drehungen und 1 Maßstabsfaktor zwischen den beiden zugeordneten kartesischen Systemen. Die Werte für die Parameter werden aus Identpunkten bestimmt, deren Koordinaten also in beiden Systemen bekannt sind. Für kleine Drehwinkel ergibt sich vereinfacht (*Formel (4.1)*):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{MGI} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + (1+m) \cdot \begin{pmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ITRF} \quad (4.1)$$

Für diese **7 Parameter** wurden vom BEV aus etwa 80 Punkten, die flächenmäßig über ganz Österreich verteilt sind, bestimmte Werte berechnet (*Tab. 4–2.*, bezogen auf den ITRF 93, (*Imrek, 1999*)). Diese österreichweiten Parameter haben laut (*BEV, 2001b*) eine *Qualität* von ca. **1,5 m**, was für Ortsbestimmungs- und Navigationsaufgaben durchaus ausreichend ist. Bezüglich des in *Kap. 4.1.1.* angeführten ETRF 89, der mittlerweile als „quasi-amtlicher“ Standard in vielen europäischen Vermessungsverwaltungen für den Kataster und kartographische Zwecke geführt wird, gibt das Bundesamt dieselben Parameter wie in *Tab. 4–2.* an (*BEV, 2006*).

³⁶ Ergänzend soll hier angemerkt sein, dass sich Österreich im Rahmen des Beitrittes zum NATO-Programm „Partnerschaft für den Frieden“ im Jahre 1995 verpflichtet hat, die nationalen kartographischen Grundlagen (und somit alle staatlichen Karten) hinsichtlich Bezugssystem und Projektion den internationalen Standards anzupassen und auf das **UTM-System** (*Universales Transversales Mercator-System*) umzustellen. Das Bundesamt gibt diesbezüglich bekannt, dass ab 2010 alle staatlichen Landkarten im UTM-Blattschnitt vorliegen (*BEV, 2009*).

Parameter	Wert	
ΔX	-577,326 m	$\pm 0,92$ m
ΔY	-90,129 m	$\pm 0,80$ m
ΔZ	-463,919 m	$\pm 0,94$ m
ω_x	15,855 ^{cc}	$\pm 0,08$ ^{cc}
ω_y	4,549 ^{cc}	$\pm 0,12$ ^{cc}
ω_z	16,349 ^{cc}	$\pm 0,06$ ^{cc}
m	-2,4232 ppm	$\pm 0,09$ ppm

Tab. 4–2.: Transformationsparameter ITRF 93 \rightarrow MGI (Imrek, 1999)

Statt der mathematisch strengen Lösung der Transformation mit 7 *Parametern* bietet sich auch eine **Näherungslösung nach Molodenski** an, die lediglich mit einer *räumlichen Verschiebung* (3 *Parameter*) operiert, also von einer Parallelität in den 3 Koordinatenachsen und einem Maßstab von 1 ausgeht, bzw. dieser in der Änderung der Ellipsoidparameter berücksichtigt wird (Imrek, 1999). Bei vielen Handnavigationsempfängern für GPS (Kap. 4.3.1.) ist diese Lösung bereits implementiert und es lässt sich der Parametersatz für das jeweilige Landessystem eingeben bzw. auswählen. Da die ermittelte Position von diesen Geräten primär in geographischen Koordinaten (Breite, Länge und ellipsoidische Höhe) angezeigt wird, benötigt es 2 *zusätzliche Parameter*, Δa und Δf , die den Unterschied in den großen Halbachsen und jenen in der Abplattung der Ellipsoide *Bessel* und *GRS-80* (Tab. 4–1.) beschreiben. In Tab. 4–3. werden die 5 *Parameter* für die Transformation, wieder bezogen auf den ITRF 93, angegeben.

Parameter	Wert
ΔX	-594 m
ΔY	-84 m
ΔZ	-471 m
Δa	-739,845 m
Δf	$-1,003\,75 \cdot 10^{-5}$

Tab. 4–3.: Parameter für Näherungslösung nach Molodenski ITRF 93 \rightarrow MGI (Imrek, 1999)

Mit diesen Parametern ist gegenüber der *Helmerttransformation* für den Bereich von Österreich nach (Imrek, 1999) mit einem *Genauigkeitsverlust* von bis zu **12 m** in der Lage zu rechnen. Dies war vor Abschaltung der Selective Availability im Mai 2000 (Kap. 2.2.3.3.) für reine C/A-Code-Empfänger meist ausreichend. Mittlerweile würden sie aber zu einer merkbaren Qualitätsbeeinträchtigung von Ortsbestimmungen führen (Kap. 6.1., Tab. 6–1.).

Können in einem GPS-Empfänger bzw. in einer Software die **Ellipsoidunterschiede** Δa und Δf nicht verwendet werden (es besteht nur die Möglichkeit zur Auswahl bzw. Eingabe eines Verschiebungsvektors), so lässt sich der dadurch begangene *Fehler* durch Differentiation der Gleichungen der *Formeln* (4.5), Einführung gewisser Näherungen, erlaubt durch die geringe Abplattung dieser Ellipsoide,

und entsprechende Umformungen folgendermaßen angeben (die Differentiale sind hier mit „ Δ “ bezeichnet, *Formeln (4.2)*):

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= 2 \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot \Delta f \\ \Delta\lambda &= 0 \\ \Delta h &= -\Delta a + a \cdot \sin^2\varphi \cdot \Delta f\end{aligned}\tag{4.2}$$

Mit den Werten Δa und Δf aus *Tab. 4–3.*, einer mittleren Breite für Österreich von $\varphi = 47,5^\circ$ und einer großen Halbachse a für das GRS-80 aus *Tab. 4–1.* ergeben sich die Differenzen:

$$\Delta\varphi = 2,063'', \quad \Delta\lambda = 0'', \quad \Delta h = 705,04 \text{ m}$$

Wie bereits aus den Formeln ersichtlich, wirkt sich eine *Vernachlässigung der Ellipsoidunterschiede* nur in der *Breite* und der *Höhe* aus, nicht jedoch in der *Länge*. Die Breitendifferenz ergibt umgerechnet mit einem mittleren Erdradius von 6379 km einen *Fehler* von **63,8 m** in der *Lage*. Dies liegt z.B. bereits über den vorgegebenen Werten für die Standortbestimmung zu E-911 (50 m , geht man von einer „*Handset-Based*“-Methode und 67% Wahrscheinlichkeit aus, *Tab. 3–1.*).

Wird die *räumliche Verschiebung* aus *Tab. 4–3.* nicht berücksichtigt, so lässt sich der begangene Fehler in ähnlicher Ableitung beschreiben (*Formeln (4.3)*):

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \frac{1}{a} \cdot (\sin\varphi \cdot \cos\lambda \cdot \Delta X + \sin\varphi \cdot \sin\lambda \cdot \Delta Y - \cos\varphi \cdot \Delta Z) \\ \Delta\lambda &= \frac{1}{a \cdot \cos\varphi} \cdot (\sin\lambda \cdot \Delta X - \cos\lambda \cdot \Delta Y) \\ \Delta h &= -\cos\varphi \cdot \cos\lambda \cdot \Delta X - \cos\varphi \cdot \sin\lambda \cdot \Delta Y - \sin\varphi \cdot \Delta Z\end{aligned}\tag{4.3}$$

Mit den Werten ΔX , ΔY und ΔZ aus *Tab. 4–3.* und einer mittleren Länge für Österreich von $\lambda = 13,3^\circ$ (östlich von Greenwich) ergeben sich die Abweichungen:

$$\Delta\varphi = 3,953'', \quad \Delta\lambda = 2,628'', \quad \Delta h = 750,85 \text{ m}$$

Die entsprechenden *Lagefehler* betragen **122,3 m** für die *Breite* und **81,3 m** für die *Länge*, was zusammen nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz **146,8 m** ergibt. Dieser Wert übersteigt für sich ebenfalls die o.a. erwähnten Vorgaben zu E-911 (100 m , diesmal auch für „*Network-Based*“-Methoden). Werden weder die Ellipsoidunterschiede noch die räumliche Verschiebung berücksichtigt, so begeht man einen **Gesamtfehler** von **160,1 m** (der bereits den vorgeschriebenen Grenzwert zu 95% Wahrscheinlichkeit bei „*Handset-Based*“-Methoden von 150 m übersteigt).

In (*Imrek, 1999*) wird weiters noch eine elegante **Näherungslösung** (des **BEV/V1**) für die Transformation angegeben, die direkt mit den geographischen Koordinaten der Ellipsoide (φ und λ) operiert (d.h. der Übergang auf kartesische Koordinaten entfällt). Diese ist aus Reihenentwicklungen abgeleitet ist und lässt sich sehr gut als Softwarelösung einsetzen. Der *Genauigkeitsverlust* gegenüber der Transformation mit *7 Parametern* beträgt in *Breite*, *Länge* und *Höhe* lediglich etwa **30 cm** (*Formeln (4.4)*):

B ... Bessel / MGI

W ... GRS-80 / WGS-84 bzw. ITRF

$$\varphi_B = \varphi_W + \Delta\varphi$$

$$\lambda_B = \lambda_W + \Delta\lambda + 17^\circ 40' \quad (\text{Differenz Ferro} - \text{Greenwich})$$

$$h_B = h_W + \Delta h$$

(4.4)

$$\Delta\varphi ["] = 1,792 - 0,113 (\lambda_W - 14) - 0,002 (\lambda_W - 14)^2 + 0,422 (\varphi_W - 47,5) + 0,0005 (\varphi_W - 47,5)^2$$

$$\Delta\lambda ["] = 2,993 + 0,490 (\lambda_W - 14) - 0,001 (\lambda_W - 14)^2 + 0,256 (\varphi_W - 47,5) + 0,005 (\varphi_W - 47,5)^2$$

$$\Delta h [\text{m}] = -46,897 + 0,549 (\lambda_W - 14) - 0,060 (\lambda_W - 14)^2 + 0,974 (\varphi_W - 47,5) + 0,114 (\varphi_W - 47,5)^2$$

4.1.3. Kartesische und geographische KS

Nachdem die *Umrechnung* zwischen *geographischen* und *kartesischen Koordinaten* für viele weitere Berechnungen unabdingbar ist (z.B. räumliche Ähnlichkeitstransformation aus *Kap. 4.1.2.*), werden die Zusammenhänge hier kurz erörtert, Begriffe geklärt und einfache Formeln angegeben.

In der Geodäsie und in der Navigation und Ortung werden unter einem **kartesischen KS** i.A. *räumliche, rechtwinkelige Dreibeine* verstanden, die ein mathematisches Rechtssystem bilden und deren Achsen denselben Maßstab besitzen. Mit so einem KS lassen sich alle Punkte der Erde beschreiben, jedoch sind die **X-, Y-, Z-Koordinaten** hinsichtlich der Orientierung am Erdkörper wenig anschaulich. Daher versucht man die Erde durch eine *geometrisch eindeutig definierte Fläche* bestmöglich zu approximieren, die zu beschreibenden Punkte per Flächennormale darauf zu projizieren und somit durch eine **Breite, Länge** und **Höhe** auf bzw. über der Fläche festzulegen.

Welche Fläche verwendet wird (*Kugel* oder *Ellipsoid*) und wie diese gelagert ist, hängt von der Art der Anwendung, dem Genauigkeitsbedarf und der Ausdehnung des zu repräsentierenden Gebietes ab (lokal, landesweit oder ganzer Globus). Die Landesvermessungen unterschiedlicher Nationen bedienten sich traditionellerweise eines *lokal gelagerten Rotationsellipsoides*. Koordinaten von GPS-Empfängern beziehen sich jedoch auf ein *globales Ellipsoid* anderen Ausmaßes mit zentraler Lagerung. In beiden Fällen spricht man von **ellipsoidischen** (geographischen) **Koordinaten** (u.a. (Bauer, 1997; 2003; 2011)).

Die **ellipsoidische Breite** eines *Punktes P* ist der Winkel φ , den das von ihm auf die Ellipsoidfläche gefällte Lot mit der *XY-Fläche* (Äquatorebene) bildet und von dort positiv nach Norden gezählt wird (*Abb. 4–3.*). Die **ellipsoidische Länge** ist der Winkel λ , den die Meridianebene durch *P* mit der Ebene des konventionell festgelegten Nullmeridians (Greenwich bzw. Ferro) einnimmt und von diesem positiv nach Osten gezählt wird. Die **ellipsoidische Höhe** h ist die Länge des Lotes von *P* bis zum Fußpunkt *P'* am Ellipsoid. Lokale und globale ellipsoidische Koordinaten eines Punktes im Raum sind nicht identisch, auch wenn die numerischen Differenzen oft nur klein sind.

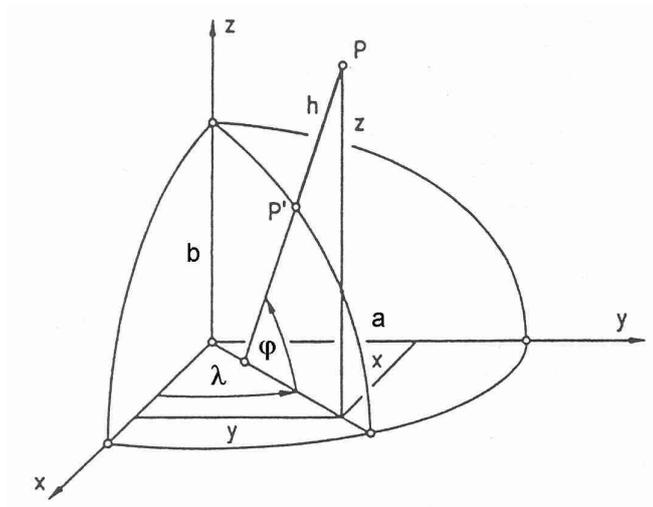


Abb. 4-3.: Kartesische und geographische Koordinaten
(Bauer, 1997) bearbeitet

Die **Umrechnung** von **ellipsoidischen** in zugeordnete **kartesische Koordinaten** und umgekehrt lässt sich nun (z.B. nach (Seeber, 1989) oder (Bauer, 1997)) wie folgt angeben (Formeln (4.5) und (4.6)):

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ Y &= (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ Z &= (N \cdot (1 - e^2) + h) \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad (\text{Querkrümmungsradius in der Breite } \varphi)$$

Bei der **Umkehrung** wird oft *iterativ* vorgegangen, es können aber auch *geschlossene Formeln* abgeleitet werden:

$$\varphi = \arctan \left(\frac{Z + e'^2 \cdot b \cdot \sin^3 \Theta}{p - e^2 \cdot a \cdot \cos^3 \Theta} \right), \quad \lambda = \arctan \left(\frac{Y}{X} \right), \quad h = \frac{p}{\cos \varphi} - N \quad (4.6)$$

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (\text{Parallelkreisradius})$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (1. \text{ Exzentrizität})$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad (2. \text{ Exzentrizität})$$

$$\Theta = \arctan \left(\frac{Z \cdot a}{p \cdot b} \right) \quad (\text{Hilfsgröße})$$

Werden anstatt der *ellipsoidischen* **sphärische** (geographische) **Koordinaten** verwendet ($a = b = R$, Kugelradius, meist mit 6379 km angegeben), so lassen sich die Vereinfachungen obiger Formeln direkt ablesen mit:

$$e^2 = e'^2 = 0 \quad \text{und somit} \quad N = R$$

4.1.4. Räumliche und ebene KS

Berechnungen auf einem Ellipsoid sind numerisch aufwendig. Daher bedient man sich in der Praxis verschiedenartiger *Abbildungen des Ellipsoides* in eine *Rechenebene*, was in diesem Abschnitt kurz erläutert werden soll.

Bei Ortsbestimmungsaufgaben wird fast nur mit ellipsoidischen Koordinaten gearbeitet (WGS-84/ITRF-Koordinaten bei GNSS). Die Darstellung von Karten- und Planwerken sowie des Katasters erfolgt jedoch in einer Ebene, in der dann auch meist alle weiteren Berechnungen vorgenommen werden. Daher wendet man mathematisch eindeutige **Abbildungen des Ellipsoides** (bzw. **der Kugel**) auf eine Ebene oder auf eine eben abwickelbare Fläche (Zylinder, Kegel) an, um aus den räumlichen geographischen Koordinaten Breite und Länge *ebene kartesische Koordinaten* (auch mit abgebildete oder Gitterkoordinaten bezeichnet) zu erhalten.

Die *Achsen dieser ebenen KS* fallen in der Regel mit einem Meridian und einem Breitenkreis (bzw. dem Äquator) zusammen. Im Gegensatz zur Mathematik und in Analogie zur Relativbewegung der Sonne und des Fixsternenhimmels werden jedoch in der Geodäsie die Nord-Süd- als *X*- und die Ost-West- als *Y*-Achse bezeichnet und Winkel (Azimute) von der *X*-Achse aus im Uhrzeigersinn angegeben (u.v. (Bauer, 1997)). Um Verwechslungen auszuschließen, bezeichnet man aus diesem Grunde die *X*-Koordinaten auch als **Hochwerte** (Northings) und die *Y*-Koordinaten als **Rechtswerte** (Eastings).

Die Abbildung des Ellipsoides auf eine Ebene kann in verschiedener Form durchgeführt werden, ist jedoch ohne *Verzerrungen* von Winkeln bzw. Flächen nicht möglich. Es lassen sich aber die Abbildungen so gestalten, dass diese Verzerrungen gering bleiben und der größte Teil der praktischen Berechnungen somit durch die Formeln der ebenen Trigonometrie lösbar sind. Zur Orientierung seien einige *in Europa gebräuchliche Abbildungen* angeführt (u.v. (Bauer, 1997)):

- **Transversale Mercator-Abbildung** (konforme, transversale Zylinderprojektion)
 - Gauß-Krüger-Koordinaten (z.B. in Österreich, Deutschland, England, Russland)
 - UTM-Koordinaten (in NATO-Karten, zukünftig in ganz Europa)
- **Lambert-Abbildung** (konforme Kegelprojektion, z.B. in Frankreich, Belgien, Dänemark oder bei der Österreichischen Karte 1 : 500 000)
- **Stereographische Abbildung** (z.B. in Holland, Polen, Rumänien)
- **Konforme Doppelprojektion** (in der Schweiz)

Auf eine nähere Darstellung von Ellipsoidabbildungen wird hier verzichtet (für Österreich z.B. beschrieben in (Imrek, 1999; Bretterbauer und Weber, 2003)). Es sei jedoch darauf hingewiesen, bei

Breiten- und Längenangaben bzw. *Hoch- und Rechtswerten in Kartenwerken* stets darauf zu achten, auf welches Ellipsoid inklusive Lagerung bzw. auf welche Abbildung sie sich beziehen. Dies ist wichtig, um zu erkennen, ob sie mit den geographischen Koordinaten aus Ortsbestimmungen (Kap. 3.3.) und deren Genauigkeitsangaben überhaupt vergleichbar sind.

4.2. Fehlermaße in der Ortsbestimmung und Navigation

Koordinaten (Kap. 4.1.) abgeleitet aus Ortsbestimmungen mittels GNSS- oder Mobilfunkmethoden (Kap. 3.3.) gewinnen ihre vollständige Aussagekraft erst dann, wenn der Nutzer weiß, mit welchen *Abweichungen zum wahren Standort* gerechnet werden muss. Eine solche Information kann nur statistischer Natur sein, d.h. eine Aussage, dass wahrer und gemessener Ort mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in dem Maße übereinstimmen, wie die Genauigkeitszahl angibt. Grundlage für die Definition von solchen **Genauigkeitsmaßen** sind die mathematische Statistik, die Fehlerlehre und die Ausgleichsrechnung.

Aussagen über die Genauigkeit von gemessenen Größen können i.A. nur dann gemacht werden, wenn ihre statistischen Eigenschaften bekannt sind. Die in der Geodäsie und Ortung üblichen Maße gehen davon aus, dass diese Größen, die zur Berechnung der Koordinaten verwendet werden, einer *Normalverteilung (Gauß-Verteilung)* unterliegen. Auf eine nähere Erläuterung dieser und des Unterschiedes zwischen den zufälligen, den systematischen und groben Fehlern sei hier verzichtet, detaillierte Aussagen dazu findet man u.a. in (Reißmann, 1980; Seeber, 1993; Hofmann-Wellenhof et al., 2003; Jäger et al., 2005; Bauer, 2011). Die weiteren Darstellungen in diesem Kapitel beruhen auf der Annahme einer Normalverteilung.

4.2.1. Eindimensionale Genauigkeitsmaße

Bei den **eindimensionalen Genauigkeitsmaßen** werden überwiegend folgende eingesetzt (u.a. (Bauer, 1997; 2003; 2011)):

- Linear Error Probable (*LEP*)
- Standardabweichung (σ)
- zweifache Standardabweichung (2σ)

Im deutschen Sprachgebrauch trägt **LEP** die Bezeichnung *wahrscheinlicher Fehler*. In der Geodäsie wird an Stelle der **Standardabweichung** (σ) auch der Begriff *mittlerer Fehler* verwendet (Formel (4.7)). Die englischsprachige Literatur bezeichnet σ mit *Root Mean Square (RMS)*. Alle genannten Genauigkeitsmaße definieren Intervalle, in denen mit einer gewissen statistischen Wahrscheinlichkeit der wahre Wert der gemessenen Größe liegt (Tab. 4-4.).

Genauigkeitsmaß	Statistische Wahrscheinlichkeit [%]
LEP	50,0
σ	68,3
2σ	95,4

Tab. 4-4.: Eindimensionale Genauigkeitsmaße in der Ortsbestimmung (Bauer, 1997)

Wobei gilt (Formel (4.7)):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta x_i^2}{n-1}} \quad n = \text{Anzahl der Messungen} \quad (4.7)$$

δx steht für die Abweichung zum Mittelwert der Messgröße bzw. zum bekannten Wert, wobei in zweitem Falle im Nenner statt $(n-1)$ nur (n) zu verwenden ist.

4.2.2. Zweidimensionale Genauigkeitsmaße

Bei Aufgaben in der Ortsbestimmung und Navigation sind die Genauigkeiten der gemessenen Elemente mitunter nur von indirektem Interesse. Sie werden benötigt, um mit Hilfe des *Fehlerfortpflanzungsgesetzes* die **Genauigkeit der Koordinaten** bzw. Position zu berechnen. Hierbei tritt die Schwierigkeit der Formulierung und Berechnung eines zusammenfassenden Genauigkeitsmaßes in Bezug auf zweidimensionale Koordinaten auf, denn dieses sollte ja einen flächenhaften Charakter haben (Bauer, 2003; Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Position stellen sich lagemäßig i.A. nicht als kreis-, sondern als ellipsenförmiger Punkthaufen dar. In der *Geodäsie* wird dafür bei der Analyse von trigonometrischen Netzen die **Fehler-** bzw. **Konfidenzellipse** als Genauigkeitsmaß verwendet. Die Wahrscheinlichkeit, dass die wahre Lage innerhalb der einfachen Fehlerellipse liegt, beträgt jedoch variabel nur bis ca. 40%. Eine Ellipse ist in der *Ortsbestimmung* wenig praktikabel, weil sie nicht ein Maß, sondern einen ganzen Satz von Daten darstellt (Größe der Halbachsen und deren Richtung im jeweiligen Koordinatensystem). Man versucht daher für Genauigkeitsmaße Kreise zu definieren, die die Ellipsen approximieren und deren Radien so gewählt sind, dass innerhalb ihrer Größe die wahre Position mit einer bestimmten statistischen Wahrscheinlichkeit liegt.

Es werden vorwiegend folgende **zweidimensionale Genauigkeitsmaße** verwendet (u.a. (Bauer, 1997; 2003; 2011)):

- Circular Error Probable (*CEP*, *CEP 95*, *CEP 99*)
- One Distance Root Mean Square (*1dRMS*)
- Two Distance Root Mean Square (*2dRMS*)

CEP ist seiner Definition nach der Radius eines Kreises, in dem mit 50% Wahrscheinlichkeit die wahre Position liegt. Analoges gilt für **CEP95** und **CEP99** mit 95% bzw. 99%. Abschätzen lässt sich **CEP** nach (Axelrad, 2001) aus den Halbachsen der Fehlerellipse (A, B) oder nach (Seeber, 1993; Mil, 1996) direkt aus den Standardabweichungen der Koordinaten (Formeln (4.8)). Die Ergebnisse sind nicht immer ganz ident, was auf die Form und Lage der Fehlerellipse zurückzuführen ist (vergleichbare Werte sind ersichtlich im Anhang 2b – Berechnungen).

$$\begin{aligned} CEP &= 0,59 \cdot (A + B) - 3\% & \text{für: } B/3 < A < 3 \cdot B \\ CEP &= 0,59 \cdot (\sigma_N + \sigma_E) \\ CEP95 &= 2,08 \cdot CEP & CEP99 &= 2,58 \cdot CEP \end{aligned} \quad (4.8)$$

Liegen die Messwerte vor, so lässt sich **CEP** nach (Axelrad, 2001) auch aus den der Größe nach geordneten radialen Abweichungen zum Mittelwert bzw. bekannten Wert als „mittlerer Radius“ entnehmen, was jedoch eine halbwegs regelmäßige Streuung der Werte voraussetzt.

Bei **dRMS** (Formel (4.9)) geht man von den Halbachsen A und B der Fehlerellipse aus (Bauer, 1997; Axelrad, 2001). Dies führt nach einigen Umformungen auf den mittleren Punktfehler σ_p oder m_p (auch **Helmert'scher Punktlagefehler** oder in der englischsprachigen Literatur *Mean Square Position Error*, **MSPE**, genannt), der häufig in der *Geodäsie* verwendet wird (Seeber, 1993). Vorsicht geboten ist bei der Interpretation des „d“ in **dRMS**. Es steht hier für die Benutzung des 1-, 2-, manchmal auch 3-fachen Wertes von **RMS** und hat nichts mit der Dimension des Genauigkeitsmaßes zu tun. Diese Definition entspricht auch der im *Federal Radionavigation Plan* der USA (FRP, 1999), jedoch nicht dem *NATO-Standardisierungsübereinkommen*, wo **2-D RMS** die Bedeutung von **1dRMS** hat (Axelrad, 2001).

$$1dRMS = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_E^2} = \sigma_p \quad (4.9)$$

Die Halbachsen A und B der Fehlerellipse sowie das Azimut Θ von A ergeben sich aus der Kovarianzmatrix der Messungen (Formeln (4.10)):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} \\ q_{yx} & q_{yy} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{\delta x_i^2}{n-1} & \sum_{i=1}^n \frac{\delta x_i \cdot \delta y_i}{n-1} \\ \sum_{i=1}^n \frac{\delta x_i \cdot \delta y_i}{n-1} & \sum_{i=1}^n \frac{\delta y_i^2}{n-1} \end{bmatrix} \\ A^2, B^2 &= 0,5 \cdot \left(q_{xx} + q_{yy} \pm \sqrt{(q_{xx} - q_{yy})^2 + 4 \cdot q_{xy}^2} \right) \\ \tan 2\Theta &= \frac{2 \cdot q_{xy}}{(q_{xx} - q_{yy})} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Da das Verhältnis der Halbachsen der Fehlerellipse unterschiedlich sein kann, ist den Maßen **1-**, **2-** und **3dRMS** keine exakte statistische Wahrscheinlichkeit zuzuordnen (Tab. 4–5.).

Genauigkeitsmaß	Statistische Wahrscheinlichkeit [%]
CEP	50,0
1dRMS	63,2 – 68,3
2dRMS	95,4 – 98,2
3dRMS	bis 99,9

Tab. 4–5.: Zweidimensionale Genauigkeitsmaße in der Ortsbestimmung (Mil, 1996; Bauer, 1997)

4.2.3. Dreidimensionale Genauigkeitsmaße

Als Maß zur Charakterisierung der **dreidimensionalen Genauigkeit** eines Ortsbestimmungssystems wird nach (Bauer, 1997) i.A. **SEP** (*Spherical Error Probable*) verwendet, in der *Geodäsie* wiederum gibt es ein **Fehlerellipsoid**. *SEP* ist der Radius einer Kugel, innerhalb derer mit der statistischen Wahrscheinlichkeit von 50% die wahre Position zu finden ist und lässt sich wie folgt abschätzen (Formel (4.11)):

$$SEP = 0,513 \cdot (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (4.11)$$

Häufig wird in der Navigationsliteratur σ (*Standardabweichung*) auch als zwei- oder dreidimensionales Genauigkeitsmaß benutzt. Dies ist problematisch, da in diesen Fällen die mit σ verbundenen Wahrscheinlichkeiten nur in Ausnahmefällen zur Verfügung stehen. Diese Ausnahme ist nach (Bauer, 2003; Hofmann-Wellenhof et al., 2008) dann gegeben, wenn die jeweiligen Standardabweichungen orthogonal zueinander stehen und gleich groß sind (Tab. 4–6.).

Genauigkeitsmaß	Statistische Wahrscheinlichkeit [%]	
	2D	3D
SEP	–	50,0
σ	39,3	19,9
2σ	86,5	73,9
3σ	98,9	97,1

Tab. 4–6.: σ als 2D oder 3D Genauigkeitsmaß (Bauer, 2003; Hofmann-Wellenhof et al., 2008)

4.2.4. Weitere mögliche Genauigkeitsmaße

Während der Standardisierungsdiskussion über verschiedene Ortsbestimmungsmethoden zu E-911 in den USA (Kap. 3.1.2.) und den dazugehörigen Simulationsrechnungen (Kap. 5.1.) wurde von verschiedenen Beteiligten auch vorgeschlagen als *spezielles Genauigkeitsmaß* einen sogenannten

„**90 % RMS**“ einzuführen (u.a. (Wylie-Green, 1998)). Hierbei hat *90 %* die Bedeutung, dass aus einem Feldversuch oder einer Simulation nur *90 %* der Ergebnisse herangezogen und die schlechtesten *10 %* weggelassen werden. D.h. es wird nur mit *90 %* ein **1dRMS** berechnet, wobei auftretende Ausfälle (kein Ergebnis bei Ortungsversuchen) zu den restlichen *10 %* gezählt werden können, aber nicht müssen (bei Simulationen gibt es Ausfälle in dem Sinne ja nicht).

Ein *90 % RMS* (zu überlegen wäre ev. auch ein *95 % RMS*) gibt ein sehr realistisches Bild vom Genauigkeitspotential der Ortsbestimmungsmethoden beruhend auf Laufzeitmessungen von Mobilfunksignalen (Kap. 3.3.5.). Hierbei wird das typische Auftreten von einigen wenigen, aber sehr großen Ausreißern nicht berücksichtigt, was anderenfalls das Ergebnis wesentlich verfälschen würde. Des Weiteren kann die *Ausfallsrate* berücksichtigt werden und ist dann auf *10 %* (bzw. *5 %*) beschränkt. Die FCC ist in ihrer Diskussion um ein entsprechendes Genauigkeitsmaß zur Beurteilung von Standortbestimmungen für E-911 jedoch bereits völlig von RMS-Angaben abgerückt (FCC, 1999) und verwendet stattdessen rein **empirische Maße** (Kap. 3.1.2. und Kap. 4.3.3.).

4.3. Testmessungen mit zwei GPS-Handgeräten

Um die in Kap. 3.1.2. und Kap. 4.2. erörterten Fehlermaße an authentischem Zahlenmaterial berechnen, analysieren und visualisieren zu können, wurden **GPS-Testmessungen** mit zwei Handgeräten unterschiedlicher Generation in einem kleinen Teil des 12. Wiener Bezirkes durchgeführt. Die Messungen sollten zahlreiche, nachvollziehbar ermittelte und dokumentierte, Positionsdaten liefern und nicht die „*Ortsbestimmungsmethode GPS*“ für sich an möglichst verschiedenen Stellen untersuchen. Weiters erlauben sie einen Blick auf die *technologische Entwicklung einfachster GPS-Geräte* und können darüber hinaus die Frage beantworten, ob und wenn ja, mit welcher Genauigkeit und Zuverlässigkeit eine unabhängige GPS-Lokalisierung in einem dicht verbauten innerstädtischen Gebiet dieser Art möglich ist.

4.3.1. Messgebiet, Messgeräte und Vorgangsweise

Im **Messgebiet** wurden **10 Stationen** mit bekannten Koordinaten im System MGI / Gauß-Krüger der MA 41-Stadtvermessung bzw. des BEV³⁷ gewählt (Abb. 4-4., Kap. 4.1.4.)³⁸. Dies ermöglicht die Bezugnahme auf geodätisch genaue Referenzpunkte und stellt durch die Vermarkung der Punkte überwiegend an Hausecken (Gabelpunkte) ein Szenario „*Lokalisierung eines Fußgängers in Kreuzungsbereichen*“ dar. Das Gebiet ist gekennzeichnet durch überwiegend geschlossene Verbauung und Gebäudehöhen zwischen 4 und 7 Stockwerken (Abb. 4-11. bis Abb. 4-13. zeigen die Situation der *Station 1*, für alle übrigen sei auf *Anhang I – Visualisierungen* verwiesen).

³⁷ (Österreichisches) Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen.

³⁸ Die Frage des interessierten Lesers, warum gerade dieses Gebiet ausgewählt wurde, lässt sich einfach damit beantworten, dass es für knapp zehn Jahre ein vertrautes Wohngebiet des Autors und somit sowohl die örtlichen Gegebenheiten als auch die Vermarkung von amtlichen Vermessungspunkten sehr gut bekannt waren.

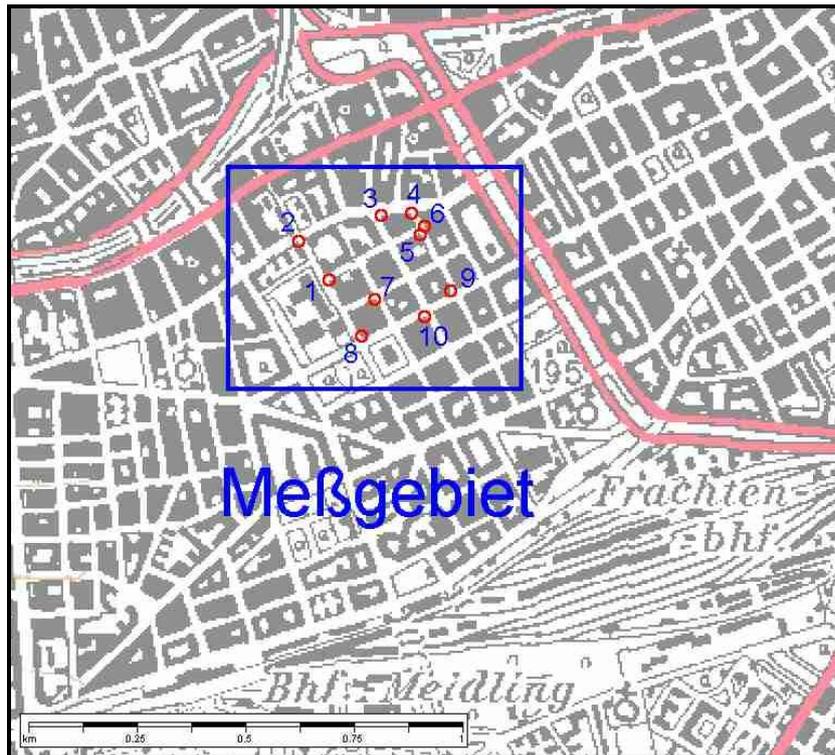


Abb. 4-4.: Die 10 Stationen des Messgebietes
(VOR, 2000) bearbeitet

Als **Messgeräte** kamen ein **Trimble Ensign** und ein **Garmin GPS III** zum Einsatz (Abb. 4-5.)³⁹. Die Geräte entstammen sehr unterschiedlichen Generationen. Trimble ist ein 3-Kanal-Empfänger aus Anfang der 90er Jahre, Garmin kann 12 Kanäle parallel verarbeiten (Kap. 2.2.2.3.), ist D-GPS-tauglich (Kap. 2.2.4.), hat eine Positions-Update-Rate von nur 1 Sekunde und stammt aus Ende der 90er. Die Ephemeriden-Aquisitionszeit (Kap. 2.2.2.2.) in einem neuen Messgebiet („Kaltstart“) beträgt beim Garmin zwischen 45 Sekunden und 1 Minute. Sind diese bekannt und noch nicht veraltet, so erhält man die erste Positionslösung nach dem Einschalten in weniger als 15 Sekunden („Warmstart“). Dies wird in der Literatur auch als „Time to First Fix“ (TTFF) bezeichnet (u.v. (Motorola, 2001)). Beim Trimble ist mit ca. dem Doppeltem der Zeitangaben zu rechnen.



Abb. 4-5.: GPS-Empfänger der Testmessungen
(Trimble, 2000; Garmin, 2002)

³⁹ Ersteres war an der Abteilung Geoinformation (TU Wien) bereits vorhanden, zweiteres ist dem Autor dankenswerterweise vom Studienkollegen Pozenel zur Verfügung gestellt worden.

Ein wesentliches und für diese Messungen bedeutsames Merkmal des Garmin-Gerätes ist seine Fähigkeit, auch sehr schwache Satellitensignale zu einer Lösung zu verarbeiten. Die Signalstärke der jeweils empfangenen Satelliten kann hierbei neben den numerischen Werten graphisch auf dem Display angezeigt werden.

Bei den Messungen, vorgenommen vom 13. bis 24. August 2000, wurde folgende **Vorgangsweise** gewählt. Sie erfolgten zu *unterschiedlichen Tageszeiten*, um verschiedene Satellitenkonfigurationen zu berücksichtigen, und sollten Erstortungen (*First Fixes*) simulieren. D.h. die Aktivierung der Geräte ist erst auf der jeweiligen Station in einer Höhe von ca. *1,20 m* über Grund („Handmessungen“) durchgeführt und die ermittelte Positionslösung direkt gespeichert worden. Die Registrierung einer Zweit- und Drittlösung im Abstand von 1-3 Minuten diente dazu, um auch die *Wiederholgenauigkeit* betrachten zu können. Die Positionen sind dabei als reine *Einzellösungen* (keine Mittelbildung im Gerät) im *Ruhezustand* (kein Tracking von Station zu Station) zu sehen.

Die Messgeräte bestimmen **3D-** und **2D-Positionslösungen** aus Pseudorangemessungen beruhend auf dem *C/A-Code* (Kap. 2.2.3.1.) in Form von Koordinaten in *Breite, Länge* und *ellipsoidischer Höhe* sowie der Zeit im **System WGS-84** (Kap. 4.1.1.). Für die Ermittlung von 2D-Lösungen (nur 3 Satelliten empfangbar) konnte eine a priori (ellipsoidische) Höhe von abgeschätzten *200* bzw. *184 m* in den Geräten voreingestellt werden. Da bei der Verspeicherung der Lösungen die angezeigte Höhe nicht registrierbar war, wurde sie für die folgenden Transformationen zusammen mit den DOP- (Kap. 2.2.3.2.) und EPE-Werten (*Estimated Position Error*) sowie der Anzahl der empfangenen Satelliten laufend manuell aufgezeichnet (siehe *Anhang 2a – Messdaten*).

Breite und *Länge* einer Positionslösung werden standardmäßig in der Form *GG°MM',DDD* angezeigt und gespeichert, wobei *G* für (Alt-) Grade, *M* für Minuten und *D* für Bruchteile davon steht. D.h. das Display liefert eine **Auflösung** von einer *Tausendstel Minute*, was umgelegt auf eine Sphäre mit Radius von *6379 km* einer Länge von **1,86 m**, also rund *2 m*, entspricht. Der Wert **EPE** wird gemäß Garmin-Handbuch „aus dem DOP-Wert, der bestenfalls *1* beträgt, und anderen Faktoren“ berechnet und gibt einen *horizontalen Positionsfehler* in Meter an.

4.3.2. Transformationen

Um die gemessenen GPS-Positionen mit den bekannten Stationskoordinaten vergleichen zu können, wurden sie mehreren **Transformationen** unterzogen:

- (1) WGS-84 geographisch → WGS-84 kartesisch
- (2) WGS-84 kartesisch → MGI kartesisch (globales – lokales System)
- (3) MGI kartesisch → MGI geographisch
- (4) MGI geographisch → MGI Gauß-Krüger (Verebnung)

Hierbei sind stets *strenge Lösungen* berechnet worden, um den Genauigkeitsverlust durch die Transformationen (im Vergleich zur Messmethode) so gering wie möglich zu halten, was jedoch für Ortsbestimmungen dieser Genauigkeitsklasse nicht unbedingt notwendig wäre. (1) ist in Kap. 4.1.3. beschrieben (*Formeln (4.5)*), (2) verwendet eine *Helmerttransformation* mit 7 Parametern nach

Kap. 4.1.2. (Formel (4.1)) mit den Parametern aus Tab. 4–2., die österreichweit eine Genauigkeit von **1,5 m** gewährleisten. (3) erfolgte wiederum nach Kap. 4.1.3. (Formeln (4.6)) und (4) ist in Kap. 4.1.4. erläutert. Somit liegen die GPS-Positionen in Form von **Gauß-Krüger-Koordinaten**⁴⁰ im System MGI der österreichischen Landesvermessung vor (GK-Y und GK-X im Anhang 2b – Berechnungen) und können mit Fehlermaßen gegenüber den bekannten Stationskoordinaten bewertet werden.

4.3.3. Ergebnisse, Fehlermaße und Visualisierungen

Der **Umfang der GPS-Messungen** ist aus Abb. 4–6. ersichtlich. Insgesamt stehen **272 Ergebnissen**, die sich in 195 3D- und 77 2D-Lösungen aufteilen, **16 Fehlschläge** gegenüber. Bemerkenswert ist, dass mit dem Garmin-Empfänger nur ein Ausfall auftrat und sämtliche Lösungen 3D waren, während Trimble mehr als zur Hälfte nur Ergebnisse in der Lage (2D) hervorbrachte. Dies zeigt eine wesentliche Entwicklung in der GPS-Empfängertechnologie dieser Kategorie in einem Zeitraum von ca. 10 Jahren, insbesondere eine Sensibilisierung gegenüber schwachen und mitunter auch reflektierten oder gebeugten (Mehrwege-) Signalen. Die *Verteilung der Ausfälle auf die Stationen* und die *Unterschiede in den 3D/2D-Ergebnissen mit dem Trimble-Empfänger* zeigen Abb. 4–7. und Abb. 4–8.

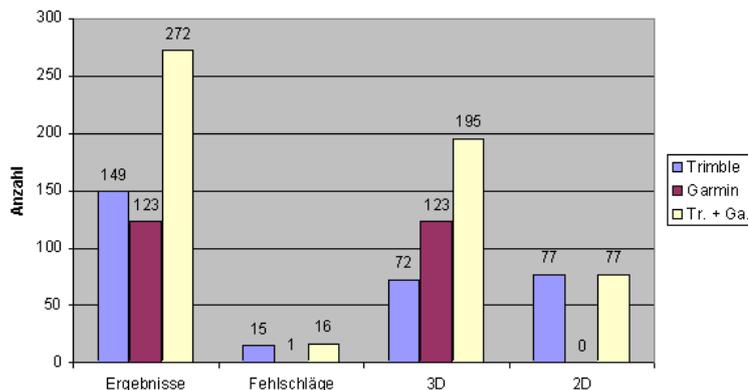


Abb. 4–6.: Umfang der GPS-Messungen (Autor)

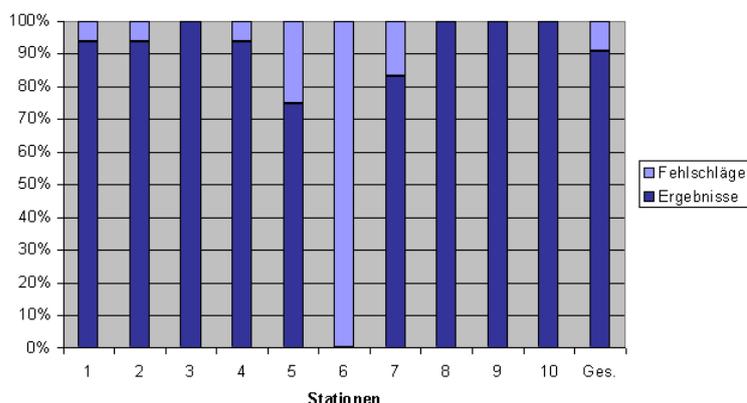


Abb. 4–7.: Fehlschläge mit dem Trimble-Empfänger (Autor)

⁴⁰ Die Berechnungen erfolgten nach den angeführten Formeln vorerst testweise mit vom Autor erstellten Basic-Programmen auf einem Pocket Computer SHARP PC-E500. Für zusätzliche Kontrollzwecke, verschiedene Variationsrechnungen und dateiweiser Ein- und Ausgabe aller gemessenen Daten konnte dankenswerterweise auch ein an der Abteilung Höhere Geodäsie (TU Wien) unter der Leitung des Ass. und heutigen Prof. Böhm erstelltes Software-Paket eingesetzt werden.

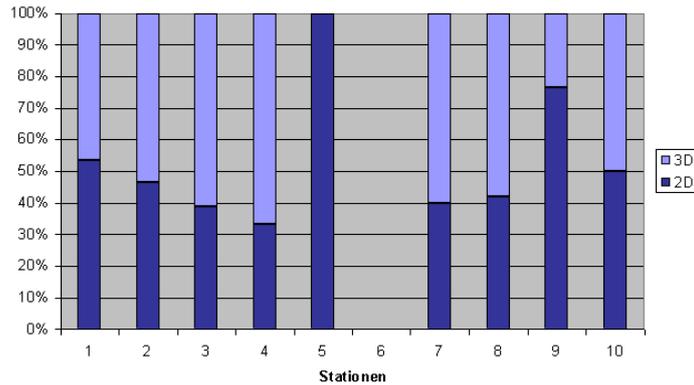


Abb. 4–8.: Verhältnis 3D/2D-Ergebnisse mit dem Trimble-Empfänger (Autor)

Die berechneten **Fehlermaße** lassen sich folgendermaßen charakterisieren:

- (1) Maße, die streng aus den Standardabweichungen in den Koordinatenrichtungen abgeleitet werden, jedoch eine variable statistische Wahrscheinlichkeit besitzen.
- (2) Maße, die mit abgeschätzten Parametern aus den Standardabweichungen in den Koordinatenrichtungen bzw. aus den Halbachsen der Fehlerellipse abgeleitet werden, jedoch eine konstante statistische Wahrscheinlichkeit besitzen.
- (3) Maße, die nach bestimmten Regeln und Prozentangaben aus den nach der Größe geordneten radialen Abweichungen entnommen werden (empirische Vorgangsweise).

Zu (1) zählen der *dRMS* (mittlere Punktlagefehler) und Vielfache davon (Kap. 4.2., Formel (4.9)), zu (2) die Angaben mit *CEP* (Formeln (4.8)) und (3) berücksichtigt Fehlermaße, die von der FCC nach langer Diskussion für die Beurteilung der Genauigkeit einer Standortbestimmung zu E-911 festgelegt wurden (*FCC 67*, *FCC 95*, (FCC, 1999; Geary, 1999), Kap. 3.1.2., Tab. 3–1.).

Nach Abkehr vom ursprünglichen Fehlermaß *IdRMS* (ca. 67%) betrachtet die FCC rein empirisch nur mehr die nach Größe geordneten radialen Abweichungen zu einem geschätzten Erwartungswert, ermittelt aus umfangreichen Testmessungen, bzw. zu einer exakt eingemessenen Position. Da jede Ortsbestimmungsmethode je nach Umgebung eine gewisse, wenn auch kleine, *Ausfallsrate* hat, wird diese hierbei in der Gesamtanzahl der Ortungsversuche berücksichtigt und sodann die Größe des an 67- bzw. 95-prozentiger Stelle liegenden Radius als Maß für die Genauigkeit herangezogen.

Ähnlich kann man nach (Axelrad, 2001) auch für den *CEP* verfahren (hier für *CEP Daten*, 50% durchgeführt), wobei jedoch Ausfälle nicht berücksichtigt werden. Diese **empirische Art** ein „Fehlermaß“ festzulegen setzt jedoch eine entsprechend große und regelmäßig verteilte „Stichprobe“ voraus, ergibt vorteilhaftere Werte bei wenigen, aber sehr großen „Ausreißern“ und lässt nach den Regeln der FCC nur einen Ausfall von maximal 5% zu.

Abb. 4–9. zeigt einen *Gesamtüberblick der Ergebnisse*, wobei „s“ hier für Standardabweichung steht. Abb. 4–10. gibt einen *Vergleich der 10 Stationen* ausgedrückt durch das Maß *IdRMS*. Die detaillierten Zahlenwerte aller Fehlermaße je Station und gesamt befinden sich im *Anhang 2b – Berechnungen*.

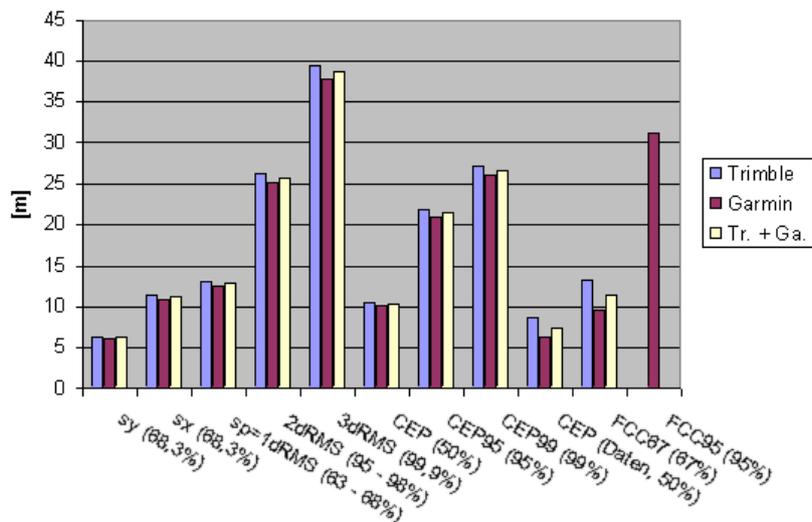


Abb. 4-9.: Berechnete Fehlermaße der Stationen 1 – 10 gesamt (Autor)

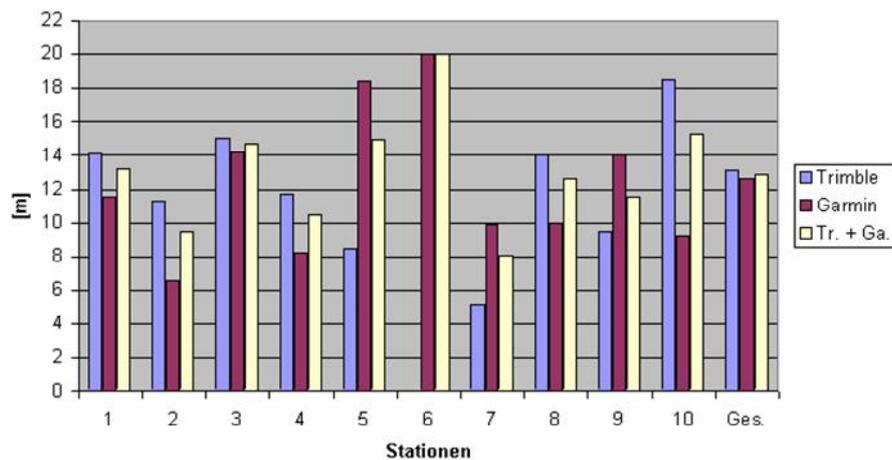


Abb. 4-10.: Die 10 Stationen im Vergleich mittels 1dRMS (Autor)

Die **Gesamtgenauigkeit** von **12,9 m 1dRMS** über alle Messungen⁴¹ bei einem mittleren *DOP* von 3,7 in einem städtischen Gebiet dieser Verbauung übersteigt die ursprünglichen Erwartungen und Abschätzungen wesentlich (Kap. 2.2.3.2. und Kap. 6.1.). Die **Gesamtausfallsrate** von **5,6 %** ist in erster Linie durch den älteren Trimble-Empfänger bedingt (9,1 %), der zudem auf Station 6 überhaupt keine Ergebnisse erzielte, während das Garmin-Gerät insgesamt nur einen Ausfall hatte (0,8 %). Dies bewirkt jedoch, dass ein Maß nach den Regeln der FCC für 95 % weder für den Trimble-Empfänger noch gesamt angegeben werden kann (Abb. 4-9.).

Vergleicht man die Ergebnisse zwischen den Stationen, so erzielt man mit dem Garmin-Empfänger unter durchschnittlichen Bedingungen genauere Ortsbestimmungen, was u.a. durch die höhere Anzahl gleichzeitig empfangener Satelliten bedingt ist. Ausnahmen bilden die Stationen 5, 7 und 9. Hier konnte der Trimble-Empfänger durch die Nichtverwendung von schwächeren (verfälschten) Signalen

⁴¹ Im Detail: Trimble: 13,1 m bei *DOP* 4,7 und Garmin: 12,6 m bei *DOP* 2,6.

unter schwierigeren Abschattungs- bzw. Mehrwegesituationen und mehr 2D-Lösungen besser abschneiden. Die Stationen 5, 6 und 7 haben die dichteste Verbauung und verzeichnen somit auch die meisten Ausfälle. Auf diese Weise „bereinigt“ und durch die symmetrische, baumlose Kreuzungssituation erzielt Station 7 trotz allem mit dem Trimble und im Schnitt die genauesten Positionsbestimmungen (*Abb. 4–10.*).

Diese Erkenntnisse liefern Ansätze wie man autonome GPS-Ortsbestimmungen mit einfachen Mitteln in ihrer Genauigkeit verbessern kann. Schwache 3D-Lösungen lassen sich durch bekannte örtliche Höhenmodelle verbessern und Signale mit einem schlechten Signal-Rauschverhältnis sollten bei einer genügenden Anzahl empfangbarer Satelliten ausfilterbar sein bzw. bei der Berechnung entsprechend niedrig gewichtet werden. Für die Anwenderseite ließe sich das z.B. durch unterschiedlich einstellbare Umgebungsprofile (Stadtzentrum, Vorstadt, offenes Gelände, Gebirge etc.) lösen.



Abb. 4–11.: Umgebungssituation der Station 1 (Autor)

Abb. 4–12. zeigt als Beispiel eine **Visualisierung** der Messungen von **Station 1** (*Abb. 4–11.*) aus *geodätischer Sicht* mit Fehlerellipsen je Geräte (in Magenta und Blau) sowie gesamt (in Schwarz). In *Abb. 4–13.* ist die *Ortungssicht* mit Fehlerkreisen für unterschiedliche Maße unter Zusammenfassung beider Geräte dargestellt⁴². In *Abb. 4–14.* sind *alle Ergebnisse* als Streubild mit Fehlerkreisen erfasst, wobei anzumerken sei, dass auf Grund der gerätebedingten Messauflösung die Anzahl der übereinander liegenden „identen Positionen“ mit zunehmender Nähe zum Zentrum ansteigt und hier der *empirische CEP* zu 50% fehlt. Eine vollständige Dokumentation aller Stationen mit Streubildern und Abbildungen der örtlichen Situation sowie eine Gesamtübersicht des Messgebietes befinden sich im *Anhang 1 – Visualisierungen.*

⁴² Die violetten Kreise zeigen die *empirisch* ermittelten Werte für eine Wahrscheinlichkeit von 50% (*CEP*) sowie für 67% und 95% (*FCC 67*, *FCC 95*), die grünen *CEP 50*, *CEP 95* und *CEP 99* und die roten *1-*, *2-* und *3dRMS*.

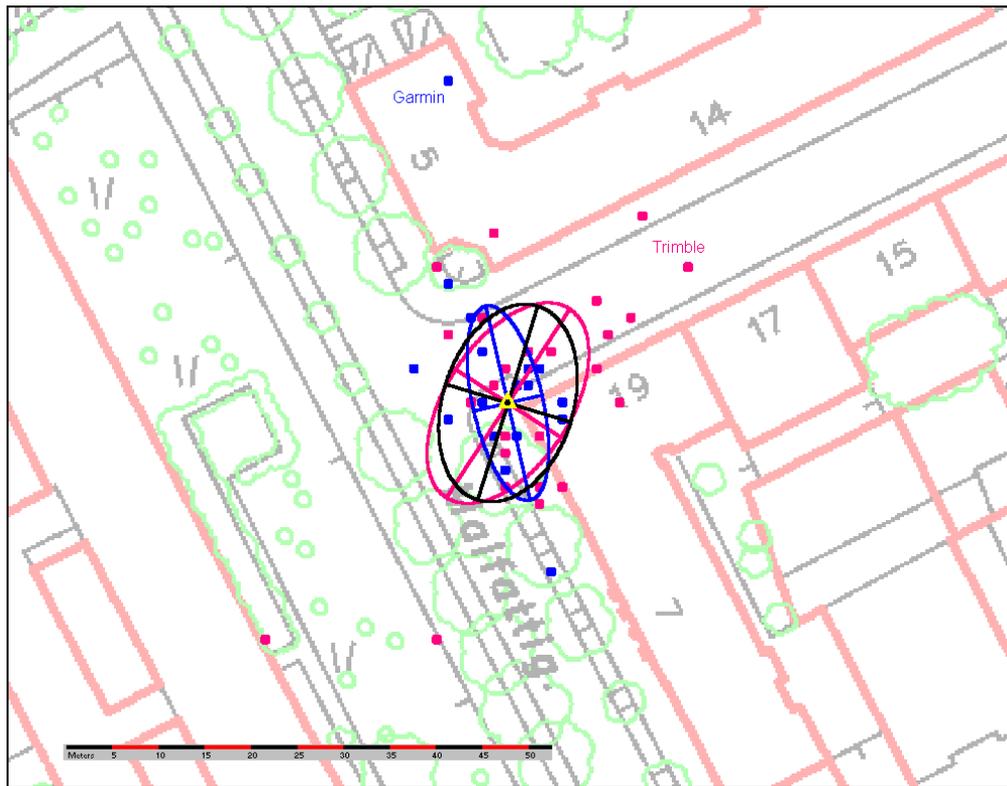


Abb. 4-12.: Station 1 mit Fehlerellipsen (Autor)

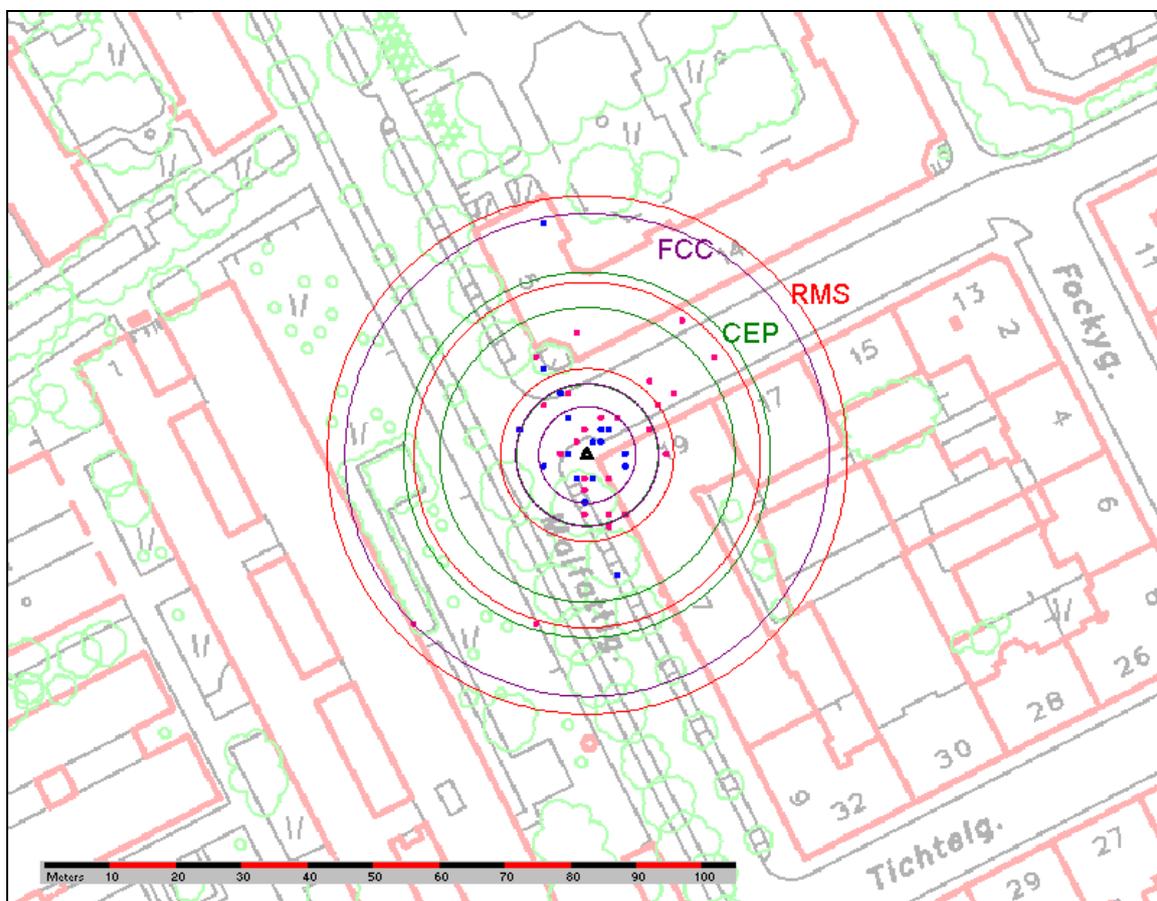


Abb. 4-13.: Station 1 mit Fehlerkreisen (Autor)

Stationen 1-10

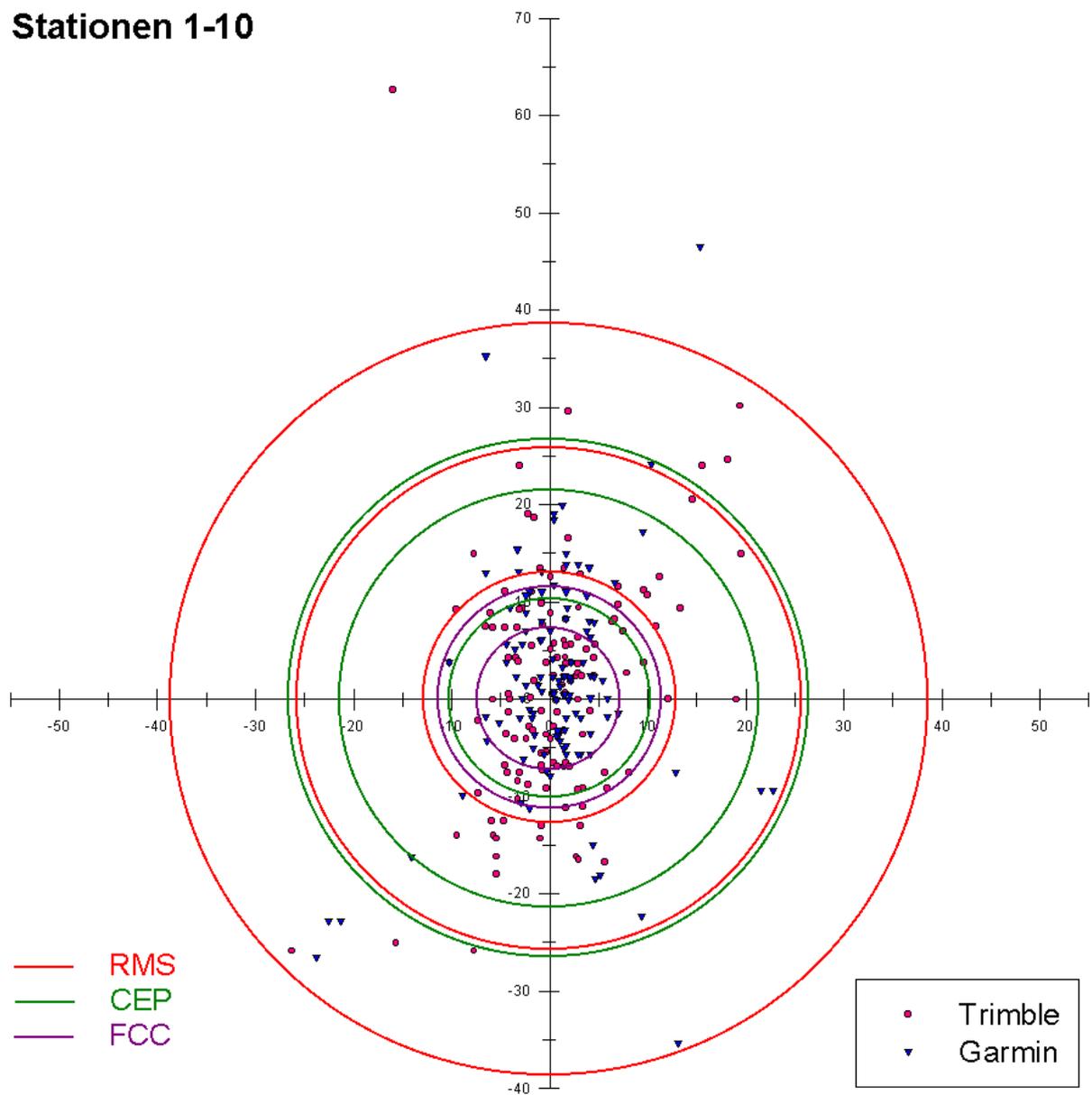


Abb. 4-14.: Gesamtstreubild mit Fehlerkreisen (Autor)

5. Simulationen und Feldversuche aus Quellen sowie Fehlerinflüsse

In diesem Kapitel werden für verschiedene **Ortsbestimmungsmethoden** mittels **Mobilfunk** beispielhaft Ergebnisse von *Simulationsrechnungen* gebracht, wie sie in den USA von verschiedenen Technologieanbietern während der Entwicklung von automatischen Ortsbestimmungssystemen für den *mobilen Notruf* (E-911, *Kap. 3.1.2.*) der FCC vorzulegen waren. Des Weiteren soll anhand einiger bekannter Anbieter von solchen Systemen dargestellt sein, wie *Feldversuche*, *Testfeldmessungen* bzw. *kommerzielle Teilimplementierungen* in bestehenden Mobilfunknetzen hinsichtlich Durchführung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit dokumentiert werden. Dabei ist von besonderem Interesse wie diese Angaben zu interpretieren sind, wenn sie untereinander bzw. mit anderen Methoden verglichen werden sollen.

Die angeführten Daten stammen von öffentlich zugänglichen Publikationen und Präsentationen. Gegebenenfalls werden besondere Eigenschaften der jeweiligen Anwendung bzw. Implementierung einer Methode kurz erläutert, soweit sie nicht in *Kap. 3.3.* schon erwähnt und für das Verständnis der weiteren Angaben wichtig sind. Zuletzt wird untersucht, welche *spezifischen Fehlereinflüsse* bei der Ortsbestimmung mit Mobilfunksignalen auftreten können.

5.1. Simulationen für die Ortsbestimmung mit Mobilfunksignalen

In den Jahren 1997 und 1998 fanden in der T1P1.5 LCS SWG (*LoCation Services Sub-Working Group*) im Auftrag des *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) und mit Unterstützung des ANSI-akkreditierten T1-Komitees (*American National Standards Institute*) ausführliche Diskussionen darüber statt, welche Ortsbestimmungsmethoden standardisiert werden sollen, um sie für E-911 effizienter einsetzen zu können, und mit welcher Priorität (u.v. (*Pacific-Bell, 1998*)). Für eine diesbezügliche Beurteilung wurden entsprechende Technik-Provider eingeladen, intensive Untersuchungen durchzuführen und diese öffentlich zur Verfügung zu stellen. Im Zuge dessen sind vor allem umfangreiche **Simulationsrechnungen** vorgenommen worden, teilweise gestützt von simplen Feldversuchen. Inzwischen sind z.B. für GSM die Methoden *Time of Arrival (TOA)*, im speziellen *Uplink-TOA*, *Enhanced observed Time Difference (E-OTD)* und *Assisted GPS (A-GPS)* standardisiert (*Kap. 3.3.*, u.a. (*Motorola, 2001*)).

Simulationen sind in diesem Zusammenhang interessant, weil sie sehr gut aufzeigen können, wie schwierig es ist, verschiedene Ortsbestimmungsmethoden vergleichbar zu machen. Weiters lassen sie erkennen, dass es nicht möglich ist, ohne zusätzlicher detaillierter Angaben, einer Methode eine allumfassende „*Qualitätszahl*“ im Sinne von Genauigkeit und Zuverlässigkeit zuzuordnen. Dieses Kapitel beschreibt daher an einem Beispiel die Simulationsbedingungen, insbesondere die unterschiedlichen örtlichen Umgebungen, soweit sie für die Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung sind. Zudem ist ein Vergleich mit einem *einfachen Feldversuch* angeführt, der dazu diente, die Simulationen zu evaluieren.

5.1.1. Aufbau und Ergebnisse der Simulationen

Abb. 5–1. zeigt den prinzipiellen **Aufbau eines Ortungssimulators**, wie er in (Lundqvist et al., 1998) detailliert beschrieben ist. Es soll hier nicht näher auf nachrichtentechnische Belange eingegangen, sondern in erster Linie betont werden, dass die Hauptschwierigkeit in der Modellierung der Mehrwegeausbreitung der GSM-Signale lag. Diese stellt den wichtigsten Teil des Simulators für Ortsbestimmungsmethoden dar, die auf Laufzeitmessungen beruhen, und geschieht im „*Channel Model*“. Des Weiteren lässt sich der Simulator gliedern in den „*System Simulator*“, den „*Radio Link Simulator*“ und der „*Data Fusion Method*“.

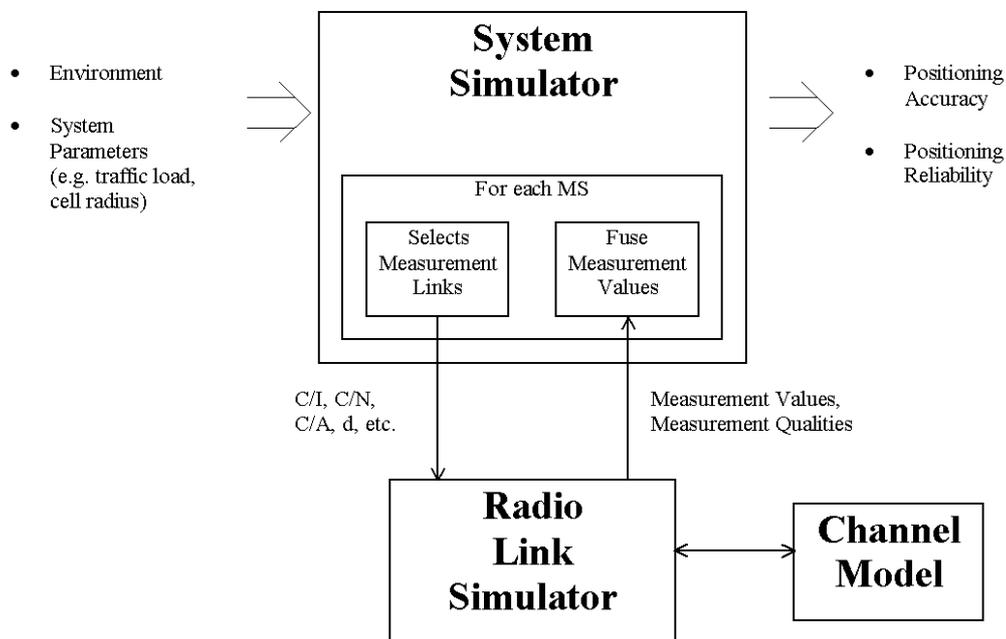


Abb. 5–1.: Aufbau des Ortungssimulators (Lundqvist et al., 1998)

Der **System Simulator** bildet die Basis des gesamten Simulators. Hier werden der Zell- und Frequenzplan modelliert, GSM-Parameter festgelegt und die zu ortenden Mobilgeräte nach einem Zufallsprinzip über den Zellbereich verteilt. Abb. 5–2. zeigt das *Zell- bzw. Sektorschema* aus regelmäßi-

gen Hexagonen, wobei gleiche Farben wiederverwendete Frequenzbereiche bedeuten (Kap. 2.1.4.1.). Hier gehören jeweils drei Sektoren zu einer Basisstation (*Base Transceiving Station*, BTS) und vier Basisstationen bilden einen Cluster (4/12 Muster). In Tab. 5–1. werden die angenommenen *Abstände zwischen den BTS* in unterschiedlichen Umgebungen angeführt, wobei sich diese Distanzen hierbei regelmäßig als dreifache Zellsektorradien ergeben.

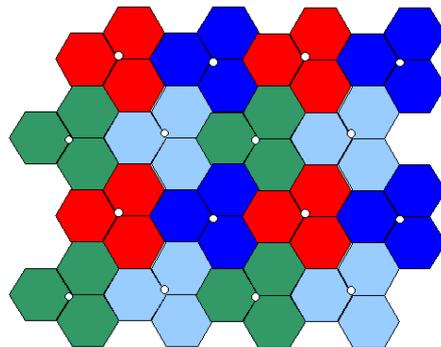


Abb. 5–2.: 4/12 Frequenz-Wiederhol-Muster eines GSM-Netzes
(Wylie-Green, 1998)

Im **Radio Link Simulator** ist die jeweilige *Ortsbestimmungsmethode* modelliert und über ihn wird auf das **Channel Model** zugegriffen, in dem die *Mehrwege-Charakteristik* der GSM-Signale auf Grund unterschiedlicher Umgebungsmodelle generiert wird. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, dass beim Vergleich unterschiedlicher Methoden dasselbe Modell, d.h. dieselbe „Umgebung“ mit all ihren sie charakterisierenden Eigenschaften verwendet wird. Für jede Verbindung Mobil- mit Basisstation (MS – BTS) wird sodann ein eigener Messwert samt Qualitätsangabe errechnet und zurück an den System Simulator geliefert. Dieser bestimmt anschließend zusammen mit den Koordinaten der beteiligten Basisstationen den wahrscheinlichsten Ort der jeweiligen Mobilstation und führt eine Qualitätsanalyse durch (**Data Fusion Method**). *Ergebnisse des Simulators* sind daher die Koordinaten der Mobilstationen sowie Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsangaben.

Umgebung	Abstand zwischen BTS [m]	Definition
Bad Urban	1.500	Hochhäuser in der Verbindungslinie (oder in der Nähe) von Basis- zu Mobilstation
Urban	1.500	dicht besiedeltes Gebiet, mehrstöckige Gebäude, Büro- und Geschäftsgegend, Stadtzentren
Suburban	4.500	besiedeltes Gebiet, Wohngegend, Vorstadt und Dörfer
Rural	30.000	spärlich bewohntes Gebiet, Felder, Wälder
Indoor Urban	1.500	
Indoor Suburban	4.500	

Tab. 5–1.: Umgebungsmodelle für die Simulationsrechnungen (Lundqvist et al., 1998)

In Tab. 5–2. sind die Simulationsergebnisse für die beiden Ortsbestimmungsmethoden **TOA** und **OTD** in unterschiedlichen Umgebungen, mit verschiedenen Geschwindigkeiten der Mobilgeräte sowie bei einer variierenden Anzahl berücksichtigter Basisstationen angeführt und entsprechenden Er-

gebnissen von **A-GPS** Simulationen bzw. Feldversuchen gegenübergestellt, wie sie in (Coleman, 1998; T1P1.5-LCS, 1998a; c; b) beschrieben sind. Die Werte unterscheiden sich (durch):

- Verwendung oder Nichtverwendung bzw. unterschiedliche Komplexität eines Algorithmus zur bedingten Kompensation von *Effekten der Mehrwegeausbreitung*.
- Die Art und Weise, wie aus den Messwerten überbestimmt die Koordinaten einer Mobilstation errechnet werden.
- Die Anzahl und Art der verwendeten Bursts bei den Laufzeitmessungen.
- Zu einem gewissen Teil in Unterschieden des Systemsimulators.
- 225 bis 500 Monte-Carlo Durchläufe.

Allen Simulationen ist gleich, dass die Basisstationen mit konstanter und maximaler Feldstärke übertragen und die RTD-Werte⁴³ als fehlerfrei angenommen werden, was jedoch beides nicht der Realität entspricht (Kap. 2.1.4.2. sowie Kap. 3.3. und (T1P1.5-LCS, 1998b)). Die Umgebungen Urban A und B unterscheiden sich offensichtlich in der Dichte der Verbauung, was aber in (Lundqvist et al., 1998) nicht weiter behandelt wird. Obwohl die simulierten Genauigkeiten bei 50 km/h i.d.R. besser abschneiden als bei 3 km/h, wird angegeben, dass sich daraus keine funktionale Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeit (GSM channel speed) und Genauigkeit ableiten lässt.

Abb. 5–3. zeigt einen Vergleich zu den Genauigkeitsangaben der Ortungsmethoden TOA, OTD und A-GPS aus Tab. 5–2. bei einer Geschwindigkeit von 3 km/h, mit 5 BTS und einer *empirischen Wahrscheinlichkeit* von 67%. Bei mehreren Angaben erfolgte eine arithmetische Mittelung, wobei die Werte von Nortel nicht berücksichtigt wurden, da sie, auch nach eigenen Angaben, sowohl zueinander als auch im Vergleich mit den anderen noch zu starke Abweichungen aufweisen. Z.B. sind die Simulationsergebnisse zu „Bad Urban“ besser als jene zu „Urban“ und weiters „Suburban“ sowie „Rural“ viel zu optimistisch ausgefallen.

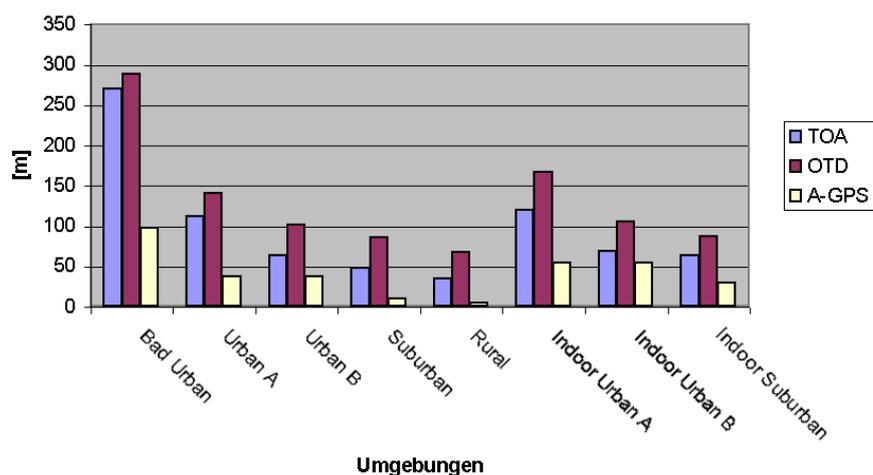


Abb. 5–3.: Genauigkeit verschiedener Ortungsmethoden aus Simulationsrechnungen (Autor)

⁴³ Round Trip Delays können zur zeitlichen Synchronisation von an einer Ortsbestimmung beteiligten Basisstationen verwendet werden.

Umgebung	MS Geschw. [km/h]	Anzahl BTS	Genauigkeit 67% [m]						
			TOA		OTD			A-GPS	
			Ericsson	Ericsson	Motorola	Nokia	Nortel	Ericsson	Snap-Track ⁴⁴
Bad Urban	3	3	>500	-		417		105	90
		4				298			
		5	270	359	246	263	239		
		7	230	310	201		125		
	50	3	478	-		445			
		4				303			
		5	223	283	206	257	238		
		7	171	234	167		133		
Urban A	3	3	227	308		239		35	40
		4				160			
		5	113	159	121	145	263		
		7	102	140	101		148		
	50	3	193	256		192			
		4				138			
		5	96	131	101	128	217		
		7	80	110	82		146		
Urban B	3	3	137	185		233		35	40
		4				160			
		5	64	98	76	133	249		
		7	54	91	61		143		
	50	3	100	164		197			
		4				127			
		5	45	78	58	113	232		
		7	38	68	49		142		
Suburban	3	3	90	142		187		12	10
		4				116			
		5	49	76	77	105	27		
		7	42	70	66		<20		
	50	3	77	65		159			
		4				116			
		5	43	46	58	91	<20		
		7	34	42	50		<20		
Rural	3	3	76	96		191		5	-
		4				103			
		5	36	55	58	92	<20		
		7	31	45	50		<20		
	100/ 50 ⁴⁵	3	61	54		162			
		4				91			
		5	30	40	45	72	<20		
		7	24	34	41		<20		
Indoor Urban A	3	3	271	304		283		-	55
		4				204			
		5	121	206	132	164	245		
		7	109	192	105		130		
Indoor Urban B	3	3	155	202		176			
		4				145			
		5	69	102	84	134	288		
		7	63	92	69		132		
Indoor Sub-urban	3	3	113	141		209		-	30
		4				119			
		5	64	78	82	103	28		
		7	55	75	70		<20		

Tab. 5-2.: Simulationsergebnisse im Zuge der Standardisierungsdiskussion (Autor)

⁴⁴ Angaben stammen aus Feldversuchen.⁴⁵ 50 km/h bei Nokia.

5.1.2. Feldversuch zur Evaluierung der Simulationen

Um die Simulationsergebnisse zu evaluieren, führte z.B. Nokia einen simplen **Feldversuch** mittels einer Ortsbestimmungsmethode beruhend auf **OTD** (*Observed Time Difference*, Kap. 3.3.5.) durch, der in (Ruutu, 1998) und (Gunnarsson et al., 1998) ausführlich dokumentiert ist. Der Versuch wurde in einem GSM-900 Netz der Telekom Finnland (SONERA) implementiert, wobei das Testgebiet 5 km^2 in Helsinki Stadt mit Gebäudehöhen von 2-3 Stockwerken umfasste. Das *Umgebungsmodell* wurde als „Suburban“ klassifiziert mit einer typischen Zellgröße von 500 m bis 3 km . Da in (Gunnarsson et al., 1998) auch davon gesprochen wird, dass Hügeln, Wald, Felder und ein See im Testgebiet vorkommen, sollte man die Umgebung eher als eine Mischung von „Suburban“ und „Rural“ betrachten (Tab. 5-1.).

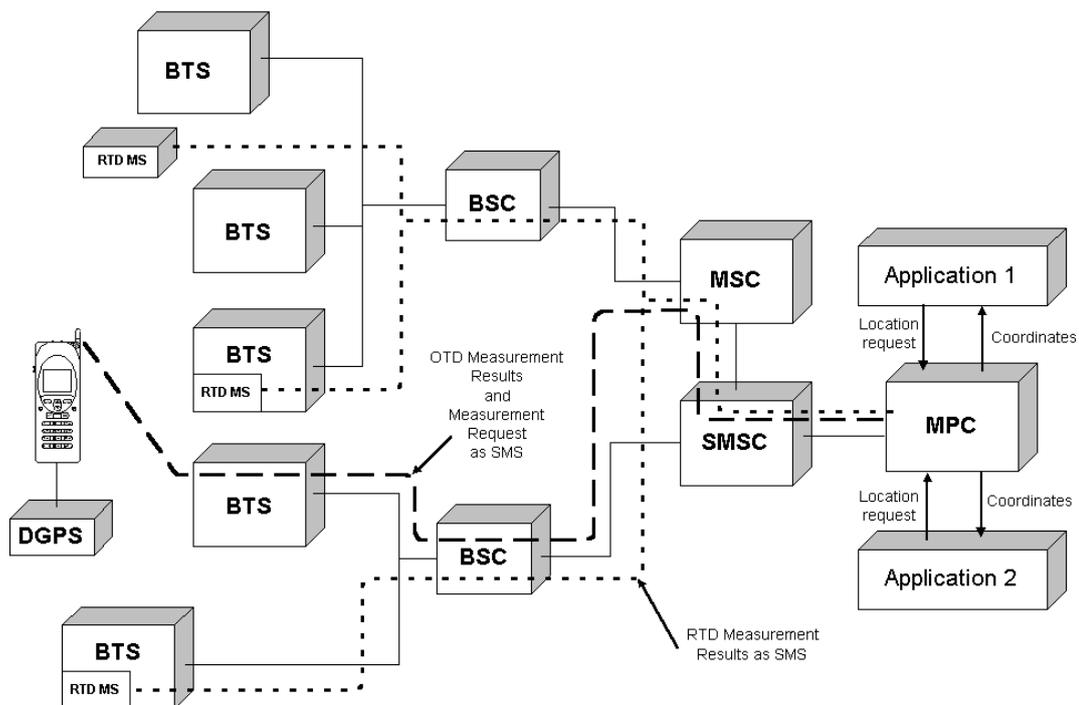


Abb. 5-4.: Aufbau des Feldversuchs mit OTD (Ruutu, 1998)

Abb. 5-4. zeigt den **Aufbau des Versuchs** als Overlay-System basierend auf dem *Short Message Service* (SMS). BTS, BSC (*Base Station Controller*), MSC (*Mobile Switching Centre*) und das *Short Message Service Center* (SMSC) sind normale Bestandteile eines GSM-Netzwerks (Kap. 2.1.3.1.), ohne jegliche Modifizierungen. Die zu ortenden **Mobilgeräte** (Nokia 8110, Abb. 5-5.) hatten eine adaptierte Software und waren mit GPS-Empfängern gekoppelt, die die Referenzposition ermittelten. Der Einsatz von D-GPS-Korrekturen (Kap. 2.2.4.) ermöglichte eine Genauigkeit von ca. 2 m . RTD-Mobilstationen (RTD-MS, später auch als **LMU**, *Location Measurement Units*, bezeichnet) zur Bestimmung der RTD-Werte von paarweisen BTS wurden entweder an eine BTS gekoppelt (mit geteilter Empfangsantenne) oder an separaten Plätzen errichtet. In beiden Fällen hatten sie eine spezielle Software zur Verfügung und ihre Position war bekannt. Im Testgebiet standen 11 RTD-MS 60 beteiligten BTS gegenüber, was einem Verhältnis von ca. 1:5,5 entspricht.

Das *Mobile Positioning Center (MPC)* stellte das Kernstück der Implementierung dar. Es steuerte und kontrollierte den gesamten Ortungsvorgang, führte die Berechnung der Koordinaten durch und stellte ein Interface für anfragende Applikationen zur Verfügung. Eine eigene Testapplikation verglich die Positionen der mittels Mobilfunk georteten Geräte mit den entsprechenden D-GPS-Koordinaten und erstellte die jeweiligen Fehlerstatistiken.



Abb. 5-5.: Nokia 8110 (Nokia-8110, 2009)

Umgebung	MS Geschw. [km/h]	Anzahl BTS	Anzahl Ortungen		OTD Genauigkeit 67% [m]	
			Standby	Gespräch	Standby	Gespräch
Suburban	0 – 60	3 – 8	550	481	239	198
		4 – 8	508	455	233	196
		5 – 8	401	404	213	189
		6 – 8	266	305	211	183
		7 – 8	103	161	191	(204)
		8	28	57	(202)	(193)

Tab. 5-3.: Ergebnisse des Feldversuchs mit OTD (Ruutu, 1998)

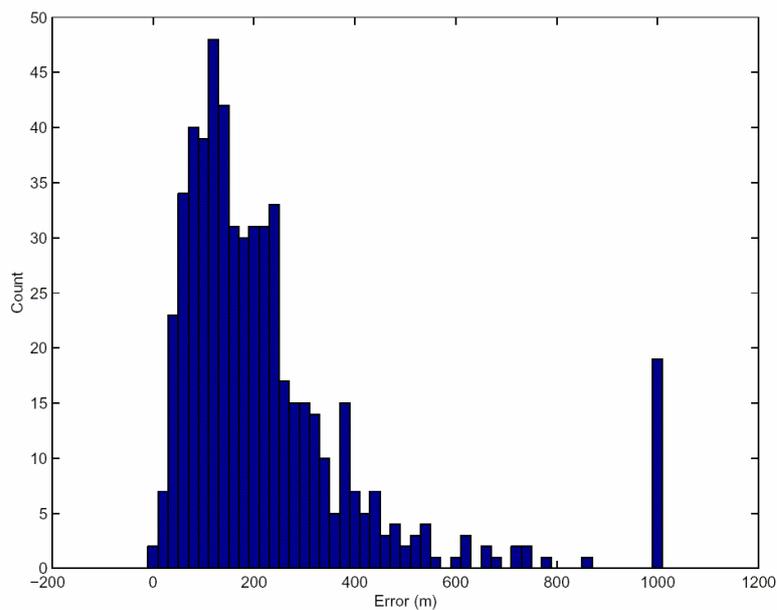


Abb. 5-6.: Fehlerhistogramm für Ortungen im Standby-Modus (Ruutu, 1998)

Tab. 5–3. zeigt die **Ergebnisse** zusammengefasst sowohl für den *Standby*- als auch für den *Gesprächsfall* bei einer *empirischen Genauigkeit* von 67%. Zweiterer entspricht den Annahmen der Simulationsrechnungen. Die Geschwindigkeiten der MS betragen variierend zwischen 0 und 60 km/h (Autofahrt in der Stadt) und es waren *maximal 8 BTS* involviert. Die wieder angewachsenen Fehlerwerte in Klammern bei 7 und 8 *BTS* entsprechen genauigkeitsmäßig nicht der Realität, sondern beruhen auf Verwechslungen der Hyperbeläste (Mehrdeutigkeit der Schnitte) bei der Berechnung der Koordinaten durch die Software. Dies geht auch aus den *Fehlerhistogrammen* (Abb. 5–6. und Abb. 5–7.) hervor, deren letzter Balken (rechts) jeweils die Anzahl aller Abweichungen größer 1000 m repräsentiert.

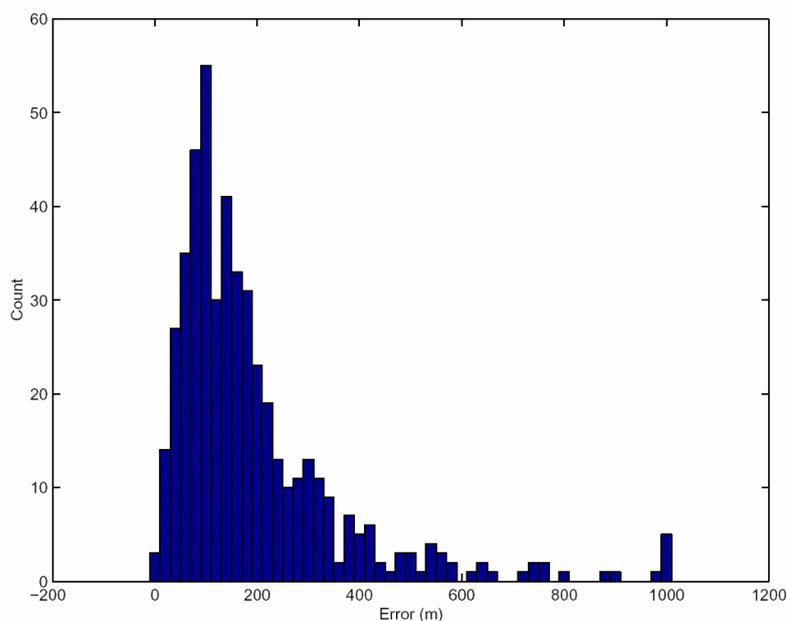


Abb. 5–7.: Fehlerhistogramm für Ortungen im Gesprächs-Modus (Ruutu, 1998)

5.1.3. Interpretation der Ergebnisse

Betrachtet man Abb. 5–3. unvoreingenommen, so würde die Ortsbestimmungsmethode **A-GPS** eindeutig als „die genaueste“ hervorgehen (Kap. 3.3.6.). Tatsache ist jedoch, dass diese, obwohl im *Gebäudeinneren* durchaus einsetzbar, in vielen Situationen von „*Bad Urban*“ (z.B. starke Abschattungsproblematik in hohen, engen Straßenschluchten) und vor allem *unter Tags* (Tunnel, U-Bahn, Tiefgarage, usw.) auch trotz hohem Aufwand in der Implementierung heute noch keine Ergebnisse liefern kann. Somit ist A-GPS auf „*Fall-Back*“-Lösungen angewiesen, wie z.B. **CGI** und **E-CGI**, bzw. auf Methoden, die nicht zellularen Mobilfunk einsetzen (wie z.B. WLAN, Bluetooth oder RFID, Kap. 3.3.).

Mobilgeräte für A-GPS erfordern zwingend eine *Erweiterung der Hardware*, was diese Methode von einer gewissen Verfügbarkeit entsprechender Endgeräte am Markt abhängig macht. Diese entwickelt sich auf den Märkten in Europa wesentlich langsamer als z.B. in den USA oder Japan. Der Grund

dafür ist, dass in der EU bis dato (mit Ausnahme von eCall) keine dezidierten *Vorgaben zu Ortungsmöglichkeiten* solcher Geräte gemacht wurden, die über CGI hinausgehen und daher das Angebot alleinig der wirtschaftlichen Nachfrage überlassen ist (*Wilde et al., 2004; Petrova und Wang, 2008*)⁴⁶.

TOA schneidet in *Abb. 5–3.* wesentlich besser ab als **E-OTD**, was jedoch sehr vorsichtig zu beurteilen ist. Die Simulationen gehen von einem *fehlerfreien* Wert für den RTD aus, dies entspricht bei GSM aber nicht der Realität, da es kein synchronisiertes Netz ist. Ursprünglich ging man davon aus (z.B. erörtert in (*Lindsey et al., 1999*)), dass die Synchronisation der LMU für die TOA-Methode (paarweise Bestimmung der RTD-Werte) mittels GPS erfolgen sollte. Dies bedeutete damals jedoch sowohl einen hohen Kostenfaktor als auch die Einführung einer zusätzlichen Technologie. Hierbei wurde vielfach argumentiert, dass es dann besser wäre, A-GPS komplett einzusetzen. Eine sinnvolle Kombination von beiden war zu dieser Zeit technologisch noch zu unausgereift.

Bei einem ausgewogenen Kosten-Nutzen Modell (im Vergleich zu E-OTD) würde es jedoch bei **TOA** einen beträchtlichen RTD- und somit auch höheren Gesamtfehler geben. Greift man zur Synchronisation der bei einer Ortsbestimmung beteiligten BTS auf die Art der E-OTD-Methode zurück, so hat man es bei den Laufzeitmessungen mit einer Mischung aus Uplink- und Downlink-Bursts zu tun und damit verbunden einer verschiedenartigen Verarbeitung in den LMU. Eine solchermaßen gestiegene Komplexität und damit Teuerung ließ die Methode TOA sehr unattraktiv erscheinen.

Dies waren wesentliche Gründe, warum in den GSM-Netzen der USA ursprünglich *A-GPS-* und *E-OTD-*Methoden für E-911 propagiert wurden. Nach der Dot-Com-Krise und den Terroranschlägen von 9/11 hat sich aus wirtschaftlichen Gründen die Umsetzung des großen Potentials der **GNSS-Verfahren**⁴⁷ um viele Jahre verzögert. Bei den Methoden, die auf der Beobachtung von Laufzeitdifferenzen von Mobilfunksignalen beruhen und dabei die MS bei den Messungen mit einbeziehen (wie das bei E-OTD der Fall ist), stellte sich zusehends heraus, dass auch trotz hohem und kostspieligem Implementierungsaufwand die vorgegebenen Genauigkeiten für E-911 (*Kap. 3.1.2., Tab. 3–1.*) nur unter sehr guten Bedingungen zu erreichen waren.

Beim *Vergleich* von *Tab. 5–2.* (Simulationen) mit dem einfachen Feldversuch von Nokia ist zu beachten, dass die Ergebnisse in *Tab. 5–3.* stets eine Mischung von Ortungen mit einer verschiedenen Anzahl von Basisstationen wiedergeben. Das begründet auch die geringere Streuung des Genauigkeitsbereiches. Die erste Zeile (3–8 BTS, d.h. im Schnitt ca. 5, 239 bzw. 198 m Genauigkeit bei 67%) zeigt somit zusammenfassende Werte dieses Versuches für einen Umgebungstyp „*Suburban*“. Warum diese Zahlen im Vergleich zu den Simulationen doch wesentlich größer ausgefallen sind, begründete Nokia in (*Ruutu, 1998*) folgendermaßen:

⁴⁶ Natürlich gibt es sehr hoffnungsvolle Ansätze und Entwicklungen auch in der EU. Es ist jedoch heute sehr schwierig abzuschätzen, wie schnell und nachhaltig sich z.B. neue Satellitensysteme wie Galileo zusammen mit mobilen Notrufsystemen (E-112) entwickeln werden. Die Entwicklungsgeschichte zu eCall zeigt deutlich die komplexen Bedingungen für einheitliche und zwingende Vorgaben bezüglich solcher Systeme (*Kap. 3.1.4.*).

⁴⁷ *Global Navigation Satellite System*, vielfach wird heute daher auch von *Assisted-GNSS*, A-GNSS, anstatt von A-GPS gesprochen, *Kap. 3.3.6.*

- Bei den Simulationsrechnungen wurden keine RTD-Fehler berücksichtigt und im Feldversuch waren die RTD-MS (LMU) hardwaremäßig nicht speziell adaptiert, um diese Synchronisationsmessungen optimal durchführen zu können.
- Die Simulationen gingen von einer regelmäßigen Zelltopologie aus (Hexagone) und beachteten kaum schlechte Schnittkonfigurationen bezüglich der Geometrie (Hyperbeläste).
- Im Feldversuch waren die Antennenstandorte der BTS nur mit einer Genauigkeit im Zehnermeterbereich bekannt und die Rechnungen bei den Ortsbestimmungen erfolgten in der Ebene. D.h. es wurden keine Höhendifferenzen zwischen BTS und MS berücksichtigt.

Omnipoint gab darüber hinaus in (*Lindsey et al., 1999*) an, dass das *Verhältnis LMU zu BTS* mit 1:5 bis 1:3 zwar ausreichend ist, um **E-OTD** betreiben zu können, jedoch im Hinblick auf eine Minimierung des RTD-Fehlers, auch was die Geometrie betrifft, auf 1:2 bis 1:1 verbessert werden sollte. Dies verursacht jedoch entsprechende Kosten, stellte sich in den USA aber ursprünglich als notwendig heraus, um den Genauigkeitsvorgaben für E-911 nachzukommen (*Kap. 3.1.2.*). Letztendlich musste diese Methode aber trotz bestem Verhältnis und hohem technischen Aufwand zugunsten anderer aufgegeben werden.

Betrachtet man in *Tab. 5–2.* (Simulationen) nur die Ergebnisse der **OTD**-Messungen für sich, so fällt auf, dass trotz gewisser einheitlicher Vorgaben wie Umgebungsmodell, Anzahl der involvierten BTS sowie Bewegungsgeschwindigkeiten der MS, die *Abweichung der Ergebnisse* unter den Anbietern ziemlich groß ist, nämlich zwischen 25 und 113 m, was 31 bzw. 75% entspricht. Dies lässt den Schluss zu, dass der Simulationsspielraum noch zu groß, bzw. ein Reglement, was die Ortsbestimmung mit diesen Methoden innerhalb eines Umgebungsmodells betrifft, zu ungenau ausgefallen ist oder gar nicht vorhanden war.

Inzwischen sind sowohl die Techniken zur *hochgenauen Zeitsynchronisation in Netzwerken* wesentlich fortgeschritten (*Horauer, 2004*), als auch die Ausrüstung zum exakten und stabilen *Zeitempfang mittels Navigationssatelliten* kostengünstiger geworden. Somit konnten sich die Methoden **UL-T(D)OA** in unterschiedlichen Ausprägungen (*Kap. 3.3.5.*), teilweise auch in *Kombination mit A-GNSS*, weitestgehend durchsetzen.

5.2. Feldversuche und Simulationen zu Assisted-GPS

SnapTrack Inc. (*SnapTrack, 2003*), eine Tochter von Qualcomm Inc. (*Qualcomm, 2014*), heute subsummiert in Qualcomm CDMA Technologies (*QCT, 2009b*), bietet mit ihrer Technologie eine weit entwickelte und einsatzerprobte Methode von **Wireless Assisted GPS** (WAG) bzw. **Hybrid Wireless Assisted GPS** (HWAG) an. Im Folgenden soll angeführt werden, was diese Methode gegenüber herkömmlichem GPS bzw. D-GPS auszeichnet, welche Bedeutung der Begriff „Hybrid“ in diesem Zusammenhang hat und wie angegebene Genauigkeitsmaße und ihre Abweichungen voneinander zu interpretieren sind.

Abb. 5–8. zeigt den prinzipiellen **Aufbau der SnapTrack-Technologie** als eine serverseitig gestützte, jedoch verteilte Architektur, die zur Standortbestimmung unterschiedlich genutzt werden kann (*Multimode-GPS*). Einerseits als *Wireless Assisted GPS* mit verschieden umfangreicher Unterstützung durch das Mobilfunknetz bzw. ein darin inkludiertes *Wide Area Reference Network* (WARN) für D-GPS, andererseits als *autonomes GPS*, wenn die Verbindung zum Funknetz nicht möglich oder nicht erwünscht ist. Die Berechnung des Standortes kann im WAG-Modus entweder am Location Server, hier *Position Determination Entity* (PDE) genannt, durchgeführt werden (*MS-assisted*) oder am Mobilgerät selbst (*MS-based*).

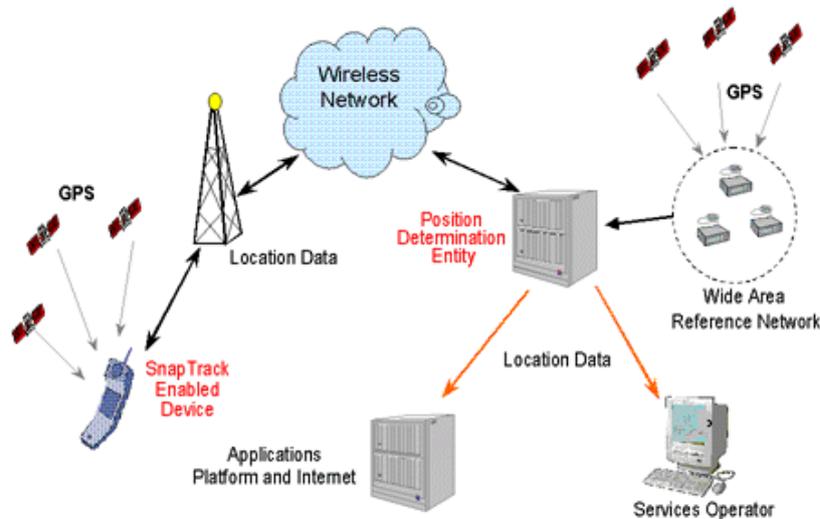


Abb. 5–8.: Aufbau der A-GPS-Technologie von SnapTrack (Burroughs et al., 2000)

SnapTrack WAG ist unabhängig von der Art des Mobilfunknetzes bzw. dessen Luftschnittstelle und funktioniert somit in analogen und digitalen sowie synchronisierten und unsynchronisierten Netzen wie GSM, CDMA, UMTS, AMPS, PDC, PHS, iDEN etc. (Abb. 2–3.). Einzige Voraussetzung für den „Wireless Assisted“-Modus ist eine Zweizeigeverbindung zwischen Endgerät und Basisstation.

SnapTrack WAG bzw. **HWAG** zeichnen sich gegenüber einem herkömmlichen GPS oder D-GPS-Empfänger auf C/A-Code-Basis (Kap. 4.3.1.) durch folgende Eigenschaften aus:

- (1) *Sehr hohe Empfangssensibilität* gegenüber schwachen GPS-Signalen ermöglicht auch Ergebnisse innerhalb von Gebäuden.
- (2) *Kurze Antwortzeiten* auch bei „Kaltstart Einzelortungen“.
- (3) *Geringer Stromverbrauch* des Empfängers.

Die hohe **Empfangssensibilität** (1) lässt sich hauptsächlich auf zwei Faktoren zurückführen. Zum einen ist es nach (Burroughs et al., 2000) nicht mehr notwendig die Navigationsnachrichten der Satelliten zu empfangen und zu demodulieren (was eine entsprechend hohe Signalstärke über eine bestimmte Zeitperiode voraussetzen würde), da diese Informationen aus dem GPS-Referenznetz bereits zur Verfügung stehen. Zum anderen kommen zur Bestimmung der Pseudorange keine herkömmlichen Korrelatoren zum Einsatz (Kap. 2.2.2.3.). Stattdessen werden die GPS-Signale eines

kurzen Empfangsintervalls („*Snapshot*“), nach A/D-Wandlung und Speicherung, in einem software-gesteuerten digitalen Signalprozessor durch spezielle Verstärkungs- und Filtertechniken aufbereitet und die so erhaltenen Signalsequenzen mit den entsprechenden Referenzen verglichen. Diese Vorgangsweise entspricht einer Anwendung von ca. 8000 Hardware-Korrelatoren im Parallelbetrieb.

Die kurzen **Antwortzeiten** (2) von nur wenigen Sekunden, in (*Sheynblat, 2001*) werden $< 8 \text{ Sek.}$ unter Kaltstartbedingungen (*Time To First Fix, TTFF*) angegeben, sind bedingt durch die geringe Signalempfangsdauer ($0,1 - 1 \text{ Sek.}$) und die schnelle digitale Signalverarbeitung. *Abb. 5–9.* zeigt hierbei den wichtigen Zusammenhang zwischen Signalempfangsdauer, Signalstärke und Genauigkeit der Ortsbestimmung mittels einer *Simulationsrechnung* und einem angenommenen *HDOP* von 1,5 (*Kap. 2.2.3.2., Formel (2.2)*). Eine Genauigkeit von 20 m RMS bei einer Signalempfangsdauer von 1 Sek. und einer Signalstärke von -150 dBm konnte auch in einem späteren Feldversuch nachgewiesen werden.

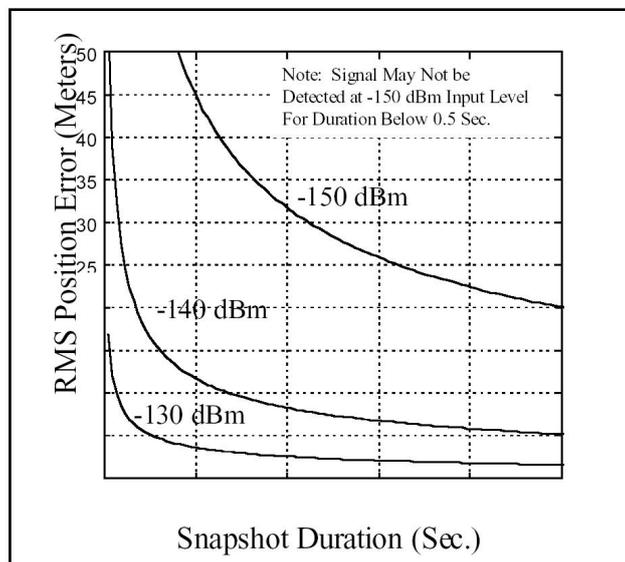


Abb. 5–9.: Ergebnisse von Simulationsrechnungen zu SnapTrack WAG (Moeglein und Krasner, 1998)

Diese kurzen Signalempfangszeiten von maximal *einer Sekunde*⁴⁸ sind möglich durch die „*assistierenden*“ *Informationen*, die das Mobilgerät per Funk aus dem Netz zur Verfügung gestellt bekommt bzw. auch selbständig an- und nachfordern kann (*Kap. 3.3.6.*). Sie umfassen Angaben darüber, welche Satelliten jeweils wo und wann erreichbar sind und ersparen somit die gesamte Suchzeit. Weiters gibt es Informationen, die es ermöglichen, auch stark eingebrochene oder durch Mehrwegeausbreitung beeinträchtigte Satellitensignale verwerten zu können.

Da nach den sehr kurzen GPS-Signalempfangszeiten das Empfangsteil ab bzw. standby geschaltet werden kann, ist es möglich, den **Stromverbrauch** (3) entsprechend niedrig zu halten. Dies kommt vor allem bei Anwendungen mit einmaliger Ortsbestimmung bzw. geringer Update-Rate zum Tragen. Ein klassisches Beispiel dafür ist der um *Standortangaben erweiterte mobile Notruf*, wie E-112

⁴⁸ In späteren Feldversuchen werden auch *zwei Sekunden* angegeben, um unter sehr schlechten Umgebungsbedingungen, wie z.B. in dicht und hoch verbauten Stadtzentren, die Verfügbarkeit zu erhöhen.

in Europa (*Kap. 3.1.3.*) und E-911 in den USA (*Kap. 3.1.2.*), da hierbei nur einmal, dafür aber mit möglichst hoher Genauigkeit, eine Ortung vorgenommen werden soll.

In (*Moeglein und Krasner, 1998*) werden auch **frühe** und von unabhängigen Mobilfunkanbietern beaufsichtigte **Feldversuche** mit einem Prototyp SnapTrack-Sensor angeführt und bezüglich Testumgebung und Genauigkeit näher beschrieben. Das Testgerät ist mit einer speziellen Antenne ausgerüstet, die nicht der von späteren kommerziellen Mobilfunkgeräten entspricht, jedoch eine ähnliche Leistung erzielen soll. Aus sieben Beispielen, die in *Tab. 5–4.* zusammengefasst sind, sei eines herausgegriffen (2. Zeile v.o.).

Umgebung	Bedingungen	Quote [%]	Lagefehler 68,3% [m]
im Freien	offenes Gelände	100	4
städtische Straße, Shinbashi, Tokyo	2-10 stöckige Gebäude, schmale Straßen und Gassen	100	15
im Fahrzeug	Geländewagen geparkt, umgeben von Bäumen und mittlerer Verbauung durch zweistöckige Gebäude; Antenne in Schulterhöhe	100	17
zweistöckiges Wohngebäude	in der Mitte des Kellergeschoßes	100	20
zweistöckiges Bürogebäude	Ziegelbauweise, in einem Raum des 1. Stockes	94	22
Straßenschlucht im Stadtzentrum von Denver, CO	20-30 stöckige Gebäude, breite Straßen; mit bekannter Geländehöhe	98	29
50 stöckiges Gebäude	Glas- / Stahlkonstruktion, im 21. Stock, ca. 4,5 m von der Außenwand entfernt	89	84

Tab. 5–4.: Zusammenfassung früherer Feldversuche mit SnapTrack WAG (Moeglein und Krasner, 1998)

Die *Umgebungsbedingungen* werden folgendermaßen beschrieben. Der Messstandort ist eine schmale, einspurige Straße im **Stadtgebiet von Shinbashi, Tokyo** (*Abb. 5–10.*), umgeben von 2 - 10 stöckigen Gebäuden und die Antennenhöhe liegt bei ca. 1 m. *Abb. 5–11.* zeigt das entsprechende *Streubild*. Die *Quote* beträgt 100 % (keine Ausfälle), die *Lagegenauigkeit* 15 m (68,3 %, d.h. offensichtlich wird hier *1dRMS* als Fehlermaß verwendet, *Kap. 4.2.2.*, *Tab. 4–5.*). Die Messungen verstehen sich als unabhängige „*First Fixes*“ im Kaltstart, d.h. es erfolgte kein Tracking und Informationen eines Ergebnisses wurden nicht an die nächste Messung weitergegeben.

Was zu einer detaillierteren *Beurteilung der Umgebungsbedingungen und der Genauigkeit* fehlt, sind Angaben über die Straßenbreite und -länge, wo genau die Antenne sich befand (Straßenmitte, Rand) und wie die Gebäude beschaffen sind (vorwiegend Stahlbeton, Ziegel- oder Holzbauweise). Weiters ist nicht bekannt, wie der Bezugspunkt („wahrer Ort“) des Streubildes ermittelt wurde (terrestrische Einmessung, bekannter Punkt oder nur auf Mittelwert bezogen) und ob die Messungen direkt hintereinander oder über den Tag verteilt erfolgten (verschiedene Satellitenkonstellationen). Für einen Vergleich mit den Simulationsrechnungen (*Abb. 5–3.*) wäre es auch wichtig zu wissen, wie lange die durchschnittliche Nettomesszeit (reine Signalempfangsdauer) betragen hat.



Abb. 5–10.: Bsp. einer SnapTrack Ortsbestimmung in Shinbashi/Tokyo (Moeglein und Krasner, 1998)

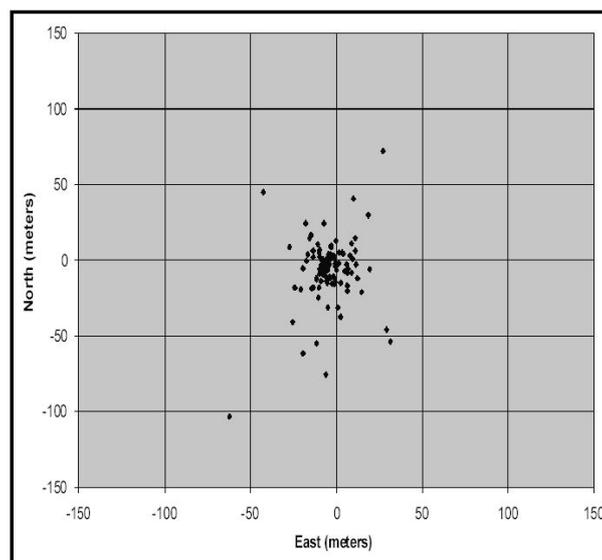


Abb. 5–11.: Streubild zur SnapTrack Ortsbestimmung in Shinbashi (Moeglein und Krasner, 1998)

In einer SnapTrack-Präsentation (Sheynblat, 2001), die besonders die Tauglichkeit dieser Technik in unterschiedlichen Mobilfunknetzen, darunter auch GSM, aufzeigt, werden **Feldversuche** in den USA, Japan und vor allem Europa aus den Jahren **1998 bis 2000** beschrieben. Diese sind dokumentiert in Form einer Abbildung und kurzen Beschreibung der Umgebung, weiters mittels Angaben zum Funknetz und zur Genauigkeit, jedoch ohne ein Fehlermaß zu erwähnen.

Im Vergleich mit (Moeglein und Krasner, 1998) findet sich auch derselbe *Feldversuch aus Tokyo* wieder (Abb. 5–10.), beschrieben als städtisch, dicht verbaut, in einem PHS/PDC Mobilfunknetz durchgeführt, aber mit einer Genauigkeit von *18 m* (anstatt *15 m* bei *68%*). Dies würde bei Anwendung der Umkehrung von *Formel (6.1)* aus *Kap. 6.* einer Wahrscheinlichkeit von *81%* entsprechen, wenn man von derselben Stichprobe ausgeht. Es könnte aber auch sein, dass in diesem Fall die Ge-

nauigkeit zu 67 bzw. 68% empirisch ermittelt wurde, was durchaus zu einem abweichenden Ergebnis führen kann (wie in *Kap. 4.3.3.* analysiert). Jedenfalls lässt sich so ca. abschätzen, wie die Genauigkeitszahlen dieser Präsentation zu beurteilen sind.



Abb. 5–12.: Situation städtische Fußgängerzone (Madrid, dicht verbaut)
(Sheynblat, 2001)



Abb. 5–13.: Situation Hyde Park (London, im Freien)
(Sheynblat, 2001)



Abb. 5–14.: Situation Restaurant Chevaux de Marly (Paris, im Gebäude)
(Sheynblat, 2001)

Die *Abb. 5–12.* bis *Abb. 5–14.* zeigen drei Beispiele von den *Feldversuchen in Europa* (GSM-Netze) mit den Genauigkeitsangaben: 37 m, 8,9 m / 100%, 31,5 m / 98,1%. Die Prozentangaben beziehen sich hier auf die Quote der Verfügbarkeit (Umkehrung der Ausfallsrate) am jeweiligen Teststandort.

Seit April 2001 gab es auch zunehmend **kommerzielle Implementierungen** der SnapTrack-Technologie, um unterschiedliche *Location Based Services* (*Kap. 3.2.*) zu ermöglichen. In Japan werden im Netz von Secom z.B. Sicherheitsdienste angeboten, KDDI bietet Navigation, Spiele und Flottenmanagement. KTF in Südkorea ermöglicht ebenfalls Sicherheitsdienste, Sprint PCS und Verizon Wireless in den USA haben SnapTrack für E-911 (*Kap. 3.1.2.*) gewählt. In (*Biacs et al., 2002*) werden

Testmessungen aus diesen Netzen dokumentiert, die nicht mehr den Charakter von eingeschränkten Feldversuchen haben, sondern mit drei kommerziell erhältlichen Mobilgeräten unter „*real-world*“ *Bedingungen* (Kosten- / Nutzenüberlegungen bei Flächendeckung, Netzauslastung etc.) stattfanden.

Die Messungen bestanden aus 223 *unabhängigen Ortsbestimmungen* in *drei verschiedenen Umgebungen*, wobei die wahre Position jeweils terrestrisch eingemessen wurde. Zu den Umgebungen zählen „*Land*“ (Rural) mit ebenem Gelände und freier Sicht nach oben, „*Vorstadt*“ (Suburban) mit Ortungen innerhalb eines Gebäudes aus Holz und „*niedrig verbaute Stadt*“ (Urban) mit unterschiedlichen Ortungen auch innerhalb von ein- und zweistöckigen Ziegelgebäuden. Genauere Angaben, z.B. wie viele Ortungen je Umgebung oder Nettomesszeiten, werden nicht gemacht.

In *Abb. 5–15.* wird als Ergebnis der *empirische Lagefehler* in Zusammenhang mit der statistischen Wahrscheinlichkeit gezeigt. *Phase II* bzw. *I* sind Begriffe aus der Implementierung von E-911 in den USA und entsprechen zwei verschiedenen vorgeschriebenen Genauigkeitsklassen, die innerhalb eines gewissen Zeitraums zu erreichen waren (*Kap. 3.1.2.*). *Phase I* nimmt für eine Ortsbestimmung den Mittelpunkt der jeweiligen Zelle, in die das Mobilgerät gerade eingebucht ist (*Kap. 3.3.2.*). *Phase II* setzt den Einsatz einer wesentlich genaueren Ortungsmethode, wie hier z.B. Hybrid Wireless Assisted GPS mit dem *gpsOne-System* von Qualcomm (*QCT, 2009a*), das auf der SnapTrack-Technologie beruht, voraus.

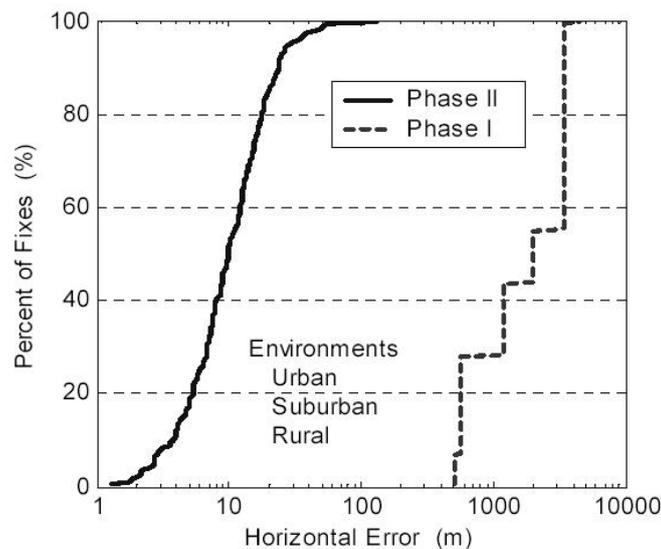


Abb. 5–15.: Genauigkeit von Testmessungen mit SnapTrack HWAG (Biacs et al., 2002)

Will man die (auffallend guten) Ergebnisse aus *Abb. 5–15.* Phase II (z.B. <15 m für 67%) mit jenen der unterschiedlichen Feldversuche (*Abb. 5–12. ff.* sowie *Tab. 5–4.*) vergleichen, so ist jedenfalls zu bedenken, dass es sich bei Ersteren bereits um **Hybridlösungen** (*Kap. 3.3.1.*), hier einer Kombination von Satelliten- und Mobilfunkmethoden, handelt. Um die Verfügbarkeit zu erhöhen, d.h. die Ausfallsrate zu senken, kombiniert *gpsOne* Laufzeitmessungen sowohl von Satelliten- als auch Mobilfunksignalen, um daraus eine Gesamtlösung für eine Ortsbestimmung zu berechnen. Neben dieser Steigerung der Zuverlässigkeit kommt es jedoch im Schnitt auch zu einem merkbaren Gewinn an Genauigkeit.

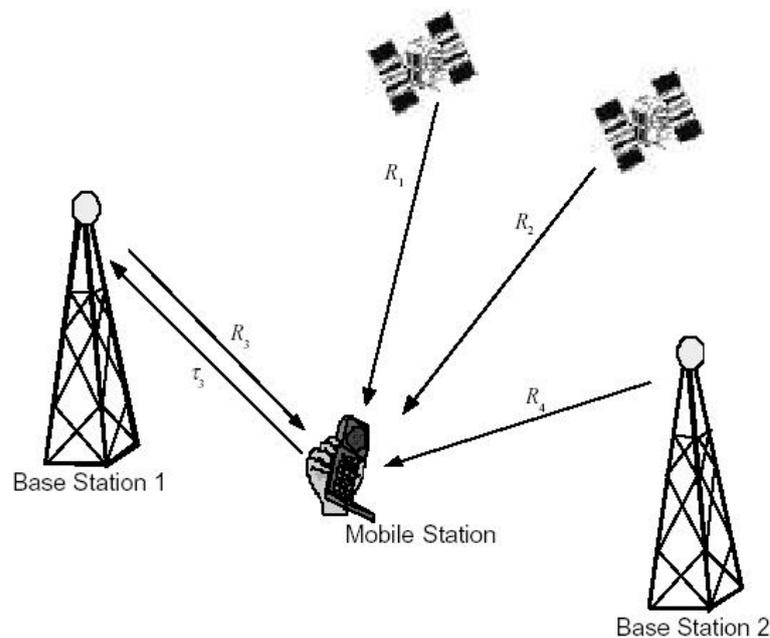


Abb. 5–16.: Beispiel zu SnapTrack HWAG mit 5 Messungen aus 4 Quellen (Krasner et al., 2002)

Abb. 5–16. zeigt als Beispiel eine Konstellation, bei der für eine *Hybridlösung* fünf Messungen verarbeitet werden können, die von zwei Satelliten und zwei Basisstationen stammen. R_1 und R_2 sind Pseudoranges von GPS-Satelliten, R_3 und R_4 solche von den Basisstationen 1 und 2. τ_s ermöglicht durch eine Hin- und Rückmessung bezüglich BTS_1 (*Round Trip Delay*) eine Zeitsynchronisation zwischen dem Funknetz und dem Mobilgerät. Dabei sei anzumerken, dass CDMA-2000-Netze standardmäßig bereits mit der Satellitenzeit (time-of-day) synchronisiert sind. Laufzeitmessungen zu Mobilgeräten entsprechen hier daher der Methode *Advanced Forward Link Trilateration* (A-FLT, Kap. 3.3.5.).

Zwei Satelliten alleine erlauben auch mit einer Geländehöhendatenbank noch keine 2D-Ortung (Kap. 2.2.3.1.). Eine zusätzliche Pseudorange-Information jedoch, die bei einem betriebsbereiten Mobilfunkgerät durch die Signalverbindung zur Heimatzelle vorliegt, ermöglicht bereits eine minimale *Hybridlösung*.

Die Abb. 5–17. stellt in vereinfachter Weise das *Flussdiagramm eines Hybridansatzes* dar, wobei hier in jedem Fall eine Lösung hervorkommt. Sind die Informationen aus Satelliten- und Mobilfunk-signalmessungen nicht ausreichend, so wird auf topologische Verfahren zurückgegriffen. Der Mittelpunkt des Zellsektors der jeweiligen Heimatzelle kann hierbei als Schätzwert für die Ortsbestimmung verwendet werden und die Größe des Sektors als ein Maß für die Genauigkeit. In GSM-Netzen lässt sich dieser Sektor durch Verschnitt mit Kreisringen beruhend auf *Timing-Advance* (Kap. 2.1.4.3.) oft noch weiter eingrenzen, besonders in ländlichen Gebieten, wo die Funkzellen größer sind ((Haselgrübler, 2000; Staudinger und Haselgrübler, 2002), Abb. 3–12.).

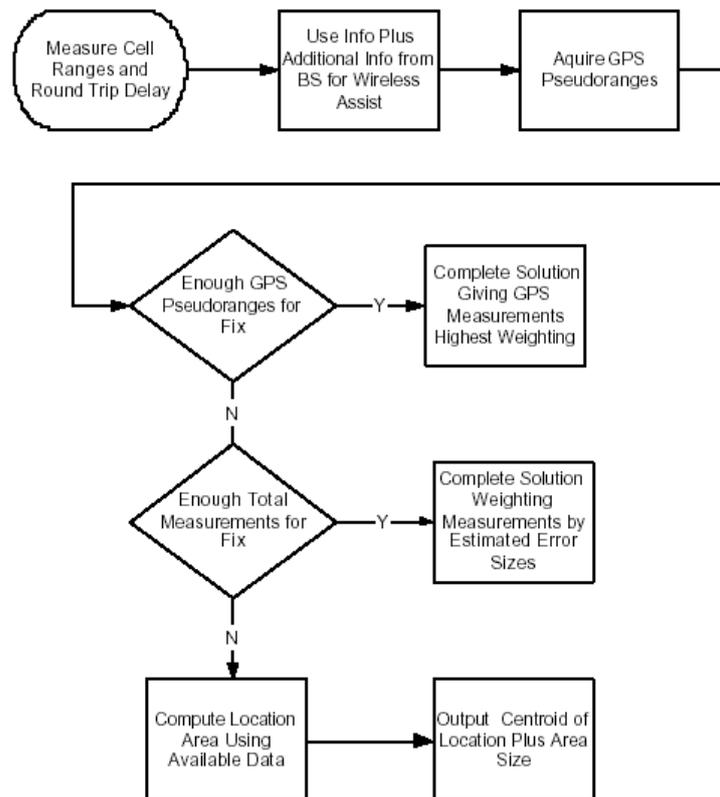


Abb. 5-17.: Flussdiagramm zu einer Hybridlösung mit WAG (Krasner et al., 2002)

5.3. Spezifische Fehlereinflüsse bei der Ortsbestimmung mit Mobilfunksignalen

In Anlehnung an *Kap. 2.1.4.2.*, wo auf die Ausbreitungscharakteristik von GSM-Signalen eingegangen wird, soll hier eine einfache Abschätzung angeführt werden, wie sich unterschiedliche **Fehlerquellen** in der Laufzeitmessung mit GSM- und UMTS-Signalen auf die damit einhergehende „*Streckenmessung*“ für darauf beruhende Ortsbestimmungsmethoden auswirken (*Kap. 3.3.5.*). Diese Art der Umlegung einer Fehlerquelle auf den entsprechenden Streckenfehler lässt sich vom Prinzip her vergleichen mit dem *User Equivalent Range Error (UERE)*, der bei GPS-Messungen (und aller weiteren GNSS-Methoden) verwendet wird (*Kap. 2.2.3.2., Tab. 2-8.*).

In (*Hein et al., 2000*) werden für diesen **Streckenfehler** in GSM- und UMTS-Netzen Werte angegeben, die in *Tab. 5-5.* zusammengefasst sind. Diese Zahlen setzen eine sehr genaue Synchronisation des Netzes der Basisstationen voraus (in der Größenordnung von wenigen Nanosekunden) sowie ein kontinuierliches Monitoring der Antennen durch LMU, damit sich ändernde Antennen-Offsets laufend korrigiert werden können. Um von einem Streckenfehler zum Ortungsfehler zu gelangen, wird auch hier, so wie bei GPS (*Formel (2.2)*), ein **HDOP** bzw. **GDOP** eingeführt (*El-Nahas, 1998*). Dies ergibt bei einem Wert von 2 - 3 für den DOP einen Fehler von ca. **0,5 - 1 km** in GSM-Netzen.

Fehlerquelle	GSM [m]	UMTS [m]
Messrauschen	270	18
Mehrwegeausbreitung	0 - 250	0 - 17
Troposphäre	0,3 - 3	0,3 - 3
Synchronisation zw. Netzwerk u. Mobilgerät	3 - 6	3 - 6
Oszillatorfehler	7,5	7,5
Gesamtfehler (67%)	270 - 370	20 - 27

Tab. 5–5.: Fehlerquellen bei der „Streckenmessung“ in GSM- und UMTS-Netzen (Hein et al., 2000)

Verglichen mit dem Feldversuch aus Kap. 5.1.2. (Tab. 5–3.) haben diese Werte eher einen pessimistischen Charakter, lassen jedoch gut die unterschiedlichen *Größenordnungen* der Fehlerquellen erkennen. **Messrauschen** und **Mehrwegeausbreitung** bilden den Hauptanteil, wobei Ersteres durch eine sich kontinuierlich verbessernde Sende- und Empfangstechnologie zusehends verringert wird. Zweitere ist dadurch bedingt, dass nur in wenigen Fällen eine direkte und störungsfreie Sichtverbindung (*Line of Sight*, LoS) zwischen der Sendeantenne der jeweiligen Basisstation und dem Mobilgerät besteht.

Dies ist vor allem im städtischen und halbstädtischen Bereich der Fall und für GSM und UMTS als *Kommunikationssystem* auch nicht notwendig. Primäres Designziel eines solchen Systems ist es, an jedem Ort des Versorgungsgebietes eine eindeutige Heimatzone mit im Vergleich zu den Nachbarzellen möglichst hoher Feldstärke zur Verfügung zu haben. Dies soll störende Interferenzen, die die Sprach- und Datenübertragungsqualität maßgeblich verringern, weitgehend vermeiden.

Bei einem *Ortungs- und Navigationssystem*, das auf der Messung von Signallaufzeiten beruht, stellt jedoch jede Abweichung vom direkten Sichtweg eine wesentliche Fehlerquelle dar. Es gibt aber verschiedene Algorithmen, um die Effekte einer solchen **Mehrwegeausbreitung** teilweise zu korrigieren (*Multipath Rejection Algorithm*, MPR). Der Umfang einer solchen nachträglichen Verbesserung ist jedoch beschränkt. Mitunter kann die Anwendung solcher Algorithmen auch zu einer Verschlechterung einiger Ergebnisse führen, wie u.a. in (Skipwith et al., 1999b) und (Villier und Lopes, 1998) erörtert wird.

Neben diesem *konventionellen Ansatz*, ein Lokalisierungs-Schema beruhend auf einer LoS-Umgebung anzuwenden und im Nachhinein die durch Mehrwegeausbreitung verfälschten Ergebnisse mit bestimmten Algorithmen zu verbessern, gibt es heute bereits gute Vorschläge, um die Position eines Mobilgerätes unter vorausgesetzten *Non Line of Sight* (NLoS) Bedingungen in einem Schritt zu bestimmen. D.h. die Positionsdaten müssen nachträglich nicht weiter verbessert werden.

In (Seow, 2009) werden beispielweise *neuere Ortungs-Schematas* diskutiert, die mit *Mehrfach- und Richtantennen* unter Verwendung der Methoden TOA und AOA, sowie ergänzend AOD (*Angle of Departure*, (Kap. 3.3.4.)), gute Simulationsergebnisse und Feldversuche erzielt haben. Mehrfachantennen, auch Antennenfelder oder -arrays genannt, werden in Zukunft z.B. ab dem 3GPP-Mobilfunkstandard HSPA+ und besonders LTE(-A) mit dem zugehörigen OFDM-Verfahren (*Orthogonal Fre-*

quency Division Multiplex) auf dem Weg zur 4. Generation sukzessive eingesetzt (Kap. 2.1.2.4.). Sie sind aber bereits heute intensiv in Verwendung bei den bekannten WLAN nach IEEE 802.11 n ff..

Die wesentliche Innovation dieser *neuen Ortsbestimmungsansätze* unter Multipath-Bedingungen besteht nun darin, dass sie die Laufzeit- und Winkelmessungen der Signale kombinieren. Bei Bedarf können auch Signalstärke-Informationen mit einbezogen werden. Es lässt sich so mit nur wenigen Basisstationen in Funkreichweite (minimal nur eine, die „Heimatzelle“) zu einer Lösung finden (Polarverfahren mit Azimut- und Distanzwerten).

Das **Messrauschen** lässt sich durch verschieden umfangreiche Mittelbildungen sowohl der Streckenmessungen selbst als auch der Ortskoordinaten zunehmend reduzieren. Hierbei besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der *Antwortzeit* und der Genauigkeit einer Ortsbestimmung. D.h. je länger die Antwortzeit beträgt bzw. betragen darf, umso mehr Einzelmessungen für eine Mittelbildung können herangezogen werden. I.A. wird jedoch versucht eine Gesamtantwortzeit, inklusive Berechnung und Übertragung der Ergebnisse, von 5 - 10 Sek. einzuhalten.

Skipwith analysiert in einem Feldversuch (Skipwith et al., 1999a) mittels der Methode E-OTD (Kap. 3.3.5.), dass sich der **Fehler einer Ortsbestimmung** in ein *Streuungsmaß* σ und eine *Abweichung* μ des Mittelwertes vom „wahren Ort“ (hier z.B. durch D-GPS ermittelt) aufteilen lässt. Der *Gesamtfehler* ergibt sich somit nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz zu:

$$\sqrt{\sigma^2 + \mu^2} \tag{5.1}$$

Während σ hauptsächlich durch das *Messrauschen* bedingt ist, hängt μ ab von:

- der Genauigkeit des Referenzortes („wahrer Ort“),
- der Genauigkeit der Standorte der BTS,
- der Genauigkeit der Standorte der LMU,
- der Frequenzstabilität der BTS und
- Effekten der Mehrwegeausbreitung.

Den größten Anteil hierbei hat die *Mehrwegeausbreitung*, da die übrigen durch entsprechenden Aufwand sehr klein gehalten werden können.

Bei **UMTS-Signalen**, die denen von GPS wesentlich ähnlicher sind als GSM-Signale, ist der Einfluss des Messrauschens und der Mehrwegeausbreitung um eine gute Größenordnung geringer ((Balbach, 2000), Tab. 5–5.). UMTS- bzw. IMT-2000-Mobilfunksysteme i.A. sind daher für Ortungen mittels Laufzeitmessung prinzipiell besser geeignet (Abb. 2–5.). Jedoch ist die Abdeckung mit einer ausreichenden Anzahl empfangbarer Basisstationen für Ortsbestimmungsmethoden, die davon drei, vier oder (für entsprechende Genauigkeiten) noch mehr bedingen (Kap. 3.3.5.), oft nicht gewährleistet (*Nah-Fern-Effekt*, Kap. 2.1.3.2.).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es für den *Vergleich verschiedener Genauigkeitsangaben* zu Ortsbestimmungsmethoden mit Mobilfunksignalen wichtig ist zu wissen, ob, wie und wie umfang-

reich „Strecken- und Winkelmessungen“ vorab, bzw. die daraus resultierenden Koordinaten im Nachhinein, statistisch ausgemittelt werden, bevor eine abschließende Angabe zur Genauigkeit einer Ortung gemacht wird. Analoges gilt für Angaben zur Anwendung von Algorithmen, die versuchen, die Effekte der Mehrwegeausbreitung zu korrigieren.

Darüber hinaus ist die erlaubte *Gesamtantwortzeit* ein wichtiges Kriterium für die Vergleichbarkeit von Genauigkeiten. Sie gibt jene Zeitdauer an, die verstreicht, z.B. von der Absetzung eines Notrufes mit E-112, bis zum Vorliegen der Position im Mobilgerät bzw. in der Notrufzentrale. In diesem Zeitfenster sind sowohl die reine Messzeit als auch die Dauer der Übertragung aller Werte (Messdaten, Ergebnisse und unterstützende Informationen für die Messungen) über die Luftschnittstelle, das Kernnetz und eventuell das Internet inkludiert. Weiters beinhaltet es die Berechnungszeit auf einem Location Server oder dem mobilen Endgerät selbst.

Je länger die Gesamtantwortzeit betragen darf und je schneller die Übertragungswege und der Location Server sind, desto mehr Zeit bleibt für die Messungen zur Ortsbestimmung selbst. Es ist somit i.d.R. möglich, genauere und zuverlässigere Ergebnisse zu erzielen. D.h. es sinken bei sonst gleichen Voraussetzungen sowohl die Genauigkeitszahl als auch die Ausfallsrate. In der überwiegenden Mehrheit der publizierten Testfälle wird jedoch nur eine Genauigkeitsangabe zu einem ermittelten Endergebnis gemacht und auf die Dauer der dahinter stehenden Antwortzeiten nicht eingegangen.

6. Analysen und Erkenntnisse

In diesem vorletzten Kapitel werden die Ergebnisse aus den *Kap. 3.* bis *Kap. 5* letztlich erläutert, gegenübergestellt, teilweise vertieft und weiters ergänzt mit Zahlenmaterial entnommen aus unterschiedlicher Literatur. Einige Angaben sind zusammengefasst, um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen und Aussagen klarer machen zu können.

Die angegebenen **Genauigkeitswerte** entsprechen i.A. einer Wahrscheinlichkeit von ca. 67% bzw. repräsentieren den *1dRMS* (*Kap. 4.2.2.*). Gegebenenfalls wurden sie nach den *Formeln (6.1)* und *(6.2)*, entnommen aus (*Staudinger und Haselgrübler, 2002*), auf dieses Niveau umgerechnet:

$$r_2 = \sqrt{\frac{\ln(1-P_2)}{\ln(1-P_1)}} \cdot r_1 \quad r_p = k_p \cdot 0,5 \cdot (\sigma_N + \sigma_E) \quad (6.1)$$

$$P = 1 - e^{-\frac{k^2}{2}} \quad k_p = \sqrt{(-2 \cdot \ln(1-P))} \quad (6.2)$$

r_p ist der Radius eines Kreises, der mit der statistischen Wahrscheinlichkeit P die wahre Position überdeckt. Ist $k_p = 1$, so entspricht r_p dem **Standard Error Circle** σ_c mit $P = 39\%$.

6.1. GPS-Messungen, Transformationen und Fehlermaße

Wie in *Kap. 4.3.3.* detailliert ausgeführt (z.B. unterschiedliche Fehlermaße für die Lagegenauigkeit – *Abb. 4–9.*, Ausfallraten der Stationen – *Abb. 4–7.*, Streubilder mit visualisierten Fehlermaßen – *Abb. 4–12.* bis *Abb. 4–14.* und *Anhang 1*, DOP- und EPE-Werte – Tabellen im *Anhang 2*), lieferten die **GPS-Messungen** mit den beiden *C/A-Code-Empfängern* Trimble und Garmin u.a. folgende (mittlere) Werte (*Tab. 6–1.*):

Gerät	Lagegenauigkeit [m]					DOP	Ausfallsrate [%]
	1dRMS	CEP 67%	FCC 67%	EPE	CEP 95%		
Trimble	13,1	13,3	13,2	–	21,8	4,7	9,1
Garmin	12,6	12,8	9,6	13,4	21,0	2,6	0,8
Gesamt	12,9	13,0	11,4	–	21,5	3,7	5,6

Tab. 6–1.: Auszug aus den Ergebnissen der GPS-Messungen (Autor)

Bei den angegebenen Lagegenauigkeiten der Messungen ist zu berücksichtigen, dass die **Auflösung** der Geräte, mit einem mittleren Erdradius umgerechnet in die Horizontale, $1,9$, also runde 2 m , beträgt. Dies ist bei einer erzielten Gesamtgenauigkeit von ca. 13 m ($1dRMS$) ausreichend. Würde ein Empfänger eine schlechtere Auflösung bieten (z.B. nur eine Bogensekunde und damit etwa 20 m), so kann ohne weitere statistische Maßnahmen keine höhere Genauigkeit in der Positionsbestimmung erwartet werden. Um eine Genauigkeit bei Zahlenangaben im Meterbereich zu halten, wurden alle Berechnungen mindestens mit Dezimeterwerten geführt und diese als Rechengrößen angegeben.

Die Parameter der angewendeten **Helmerttransformation** vom übergeordneten *WGS-84* (in dem GPS-Messungen stattfinden) in das *lokale System der Landesvermessung (MGI)* haben eine Güte von (österreichweit) $1,5\text{ m}$ (Kap. 4.1.2., Tab. 4–2.). Das ist von wesentlicher Bedeutung, da auch Transformationen mit beträchtlich geringerer Genauigkeit üblich bzw. sogar in Geräten vorweg eingestellt sind. Als Beispiel sei hier nochmals erwähnt die häufig verwendete **Näherungslösung von Molodenski**, die zwar wesentlich einfacher anzuwenden, aber nur eine Güte von 12 m (Tab. 4–3.) aufweist. Nach Abschaltung der *Selective Availability* am 2. Mai 2000 (Kap. 2.2.3.3.) ist dies für alle Ortsbestimmungsmethoden, die GPS mit einbeziehen, nicht mehr ausreichend. D.h. es ist stets zu hinterfragen, was für ein Ellipsoid, mit welcher Lagerung und Abbildung sowie eventuell hinzugefügten Transformationen, angegebenen Lage- und Höhenwerten von Ortsbestimmungen und deren Genauigkeitsangaben zugrunde liegen.

Die im Vergleich zur **Abschätzung** aus Kap. 2.2.3.2. (24 m bei einem *UERE* von 8 m und angenommenen DOP von 3, bzw. $29,6\text{ m}$ bei einem mittleren DOP der Ergebnisse von 3,7) doch wesentlich höhere Lagegenauigkeit der GPS-Messungen lässt sich vor allem durch die Steigerung der Leistungsfähigkeit moderner GPS-Empfänger dieser Kategorie begründen (z.B. geringeres Rauschen, d.h. höheres Signal-Rausch-Verhältnis, bessere Auflösung bei der Bestimmung der Pseudorange). Des Weiteren hat sich nach (*IGS, 2001*) auch die Genauigkeit der Broadcast-Ephemeriden (Tab. 2–8.) von angegebenen $4,2$ auf ca. $2,6\text{ m}$ verbessert. Jüngere Literatur gibt in Zusammenhang mit neueren Empfängern dieser Art, genaueren Modellen zur Fehlerabschätzung und präziseren Ephemeriden ($2,1\text{ m}$) einen *UERE* von nur mehr $5,3\text{ m}$ an (*Hofmann-Wellenhof et al., 2008*). Dies ergibt zusammen mit dem mittleren DOP aus Tab. 6–1. eine Abschätzung von $19,6\text{ m}$, bzw. $13,8\text{ m}$, wenn man nur den DOP des Garmin-Empfängers heranzieht.

Betrachtet man Tab. 6–1. genauer, so fällt auf, dass das Fehlermaß $1dRMS$ mit ca. 67% (aus der Geodäsie bekannt als der *Helmert'sche Punktlagefehler*) sehr gut übereinstimmt mit dem **CEP 67%**, das nach Formel (6.1) aus dem **CEP 50%** umgerechnet wurde. Dies bestätigt die Schärfe der Berechnungsart von **CEP** nach Formel (4.8), hier unter Anwendung der Standardabweichungen in den Koordinatenrichtungen. Beim Fehlermaß **FCC 67%**, das (wie in Kap. 4.3.3. diskutiert) nach einem Abgehen vom *strengen dRMS* rein empirisch ermittelt wird, zeigt sich, dass es nur wegen der hohen Ausfallsrate des Gerätes Trimble von fast 10% bei diesem mit den anderen beiden Maßen zusammenpasst. Dies ist jedoch nicht der Fall beim Empfänger Garmin, mit nur knapp einem Prozent Ausfallsrate, wo es einen viel zu optimistischen Wert liefert ($9,6$ zu $12,6$ bzw. $12,8\text{ m}$).

Der **EPE** (*Estimated Position Error*), ein Fehlerwert, welcher nur am Garmin angezeigt und laut Herstellerangaben „aus dem DOP und anderen Faktoren“ berechnet wird und einen „horizontalen Positionsfehler in Meter“ angibt, fügt sich sehr gut zu den Werten von $1dRMS$ und **CEP 67%**. Dies lässt auf ein gutes Modell bei der Abschätzung und einen Wahrscheinlichkeitsbereich von ca. 67% schließen. Die angegebenen Werte zu **CEP 95%** sollen die numerischen Größenverhältnisse vermitteln,

um die Fehlermaße mit wachsender Wahrscheinlichkeit steigen (hier im Mittel um $8,6\text{ m}$ in Bezug auf den $1dRMS$ mit ca. 67%).

Zusammenfassend lässt sich somit resümieren, dass Genauigkeitsmaße mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten, eingesetzt bei der Ortsbestimmung mit Mobilgeräten, natürlich auch stark verschiedene Werte liefern können, jedoch auch solche mit gleichem Niveau mitunter beträchtlich voneinander abweichen. Dies tritt besonders bei jenen auf, die *empirisch* ermittelt werden. Die **Regeln der FCC**, nach denen empirisch Genauigkeitsangaben gemacht werden, bieten einerseits den Vorteil der Einfachheit und Verständlichkeit (es benötigt nur eine Größenordnung und Prozentrechnung), beinhalten andererseits jedoch den Nachteil der starken Abhängigkeit von der *Ausfallsrate*. Nur wenn diese eine gewisse Größe erreicht, werden realistisch vergleichbare Genauigkeitswerte hervorgebracht.

Bezieht man die *Ausfallsrate* nicht mit ein, so lassen die Messungen eindeutig einen Trend zu besseren Werten bei den empirischen Maßen erkennen. *Abb. 4–9.* zeigt ein Diagramm mit Vergleichsmöglichkeit der Werte des $CEP\ 50\%$, einmal berechnet aus den Standardabweichungen (z.B. für beide Empfänger gemeinsam zu $10,3\text{ m}$) und einmal entnommen der geordneten Datenreihe ($CEP_{Daten}, 50\%$ zu $7,3\text{ m}$).

Diese Gegebenheiten sind jedenfalls sehr genau zu betrachten, wenn versucht wird, die Qualitätsangaben von unterschiedlichen Feldversuchen, Testmessungen und Implementierungen im Bereich der Ortsbestimmung von mobilen Endgeräten, wie z.B. Smartphones oder eCall-Boxen, zu vergleichen. Verschärft formuliert lassen sich ohne detaillierte Kenntnisse von den Hintergründen der Genauigkeitsangaben keine fundierten Aussagen zu Vergleichen von Standortangaben machen.

6.2. Simulationsrechnungen

Die Ergebnisse der beschriebenen **Simulationen** aus *Kap. 5.1.* (*Tab. 5–2., Abb. 5–3.*) lassen sich, um ihre Aussagekraft zu verbessern, auszugsweise folgendermaßen wiedergeben (*Tab. 6–2.*). Für die Geschwindigkeit der Mobilstation wird 3 km/h gewählt (also für Fußgänger zutreffend) und die Anzahl der beteiligten Basisstationen bzw. LMU soll 5 betragen (in städtischen Gebieten können mit GSM mitunter mehr erreicht werden, in ländlichen meist nur weniger). Weiters ist jedenfalls zu berücksichtigen, dass der *Round Trip Delay* (RTD), der bei den Methoden TOA und (E-)OTD eine Zeitsynchronisation ermöglicht, bei den Simulationen als fehlerfrei angenommen wurde, was den Gegebenheiten in der Praxis jedoch nicht entspricht. Dies haben auch spätere Feldversuche belegt, aber auf prinzipielle Erkenntnisse der Simulationen hat das keinen Einfluss, da alle Simulationen davon betroffen sind.

Simulationsrechnungen für Ortsbestimmungsmethoden im Mobilfunk haben ab der Vorgabe von Genauigkeitswerten für die Standortbestimmung zu E-911 durch die FCC in den USA besondere Bedeutung erlangt. Es herrschte ein großer Mangel an praktischem Wissen und Erfahrung, welche Methode wo, wie eingesetzt, welche Genauigkeiten erreichen kann. Deshalb wurde bei der Modellierung der Simulationen in erster Linie auf die Art der Ortsbestimmung Rücksicht genommen, darauf-

hin in welcher Umgebung sie stattfindet und wie die dort jeweils herrschenden Mehrwegeausbreitungen (Multipath) durchschnittlich in Betracht gezogen werden können. Weitere wichtige Eingangsparameter für die Simulationen waren die Anzahl der in eine Ortung involvierten Basisstationen sowie die Geschwindigkeit des Mobilgerätes.

Umgebung	Genauigkeit 67% [m]				Diff. OTD	OTD Mittelw. – TOA	$\Delta\%$
	TOA	OTD	A-GPS	OTD Mittelwert			
Bad Urban	270	246 – 359	105	289	113	19	495
Urban A	113	121 – 159	35	142	38	29	31
Urban B	64	76 – 133		102	57	38	50
Suburban	49	76 – 105	12	86	29	37	-22
Rural	36	55 – 92	5	68	37	32	16
Indoor Urban A	121	132 – 206	–	167	74	46	61
Indoor Urban B	69	84 – 134	–	107	50	38	32
Indoor Suburban	64	78 – 103	–	88	25	24	4

Tab. 6–2.: Genauigkeitsbetrachtungen von Simulationsrechnungen (Autor)

Nachdem die Art der Genauigkeitsangabe und die Werte, die zu erreichen waren, endgültig festgelegt waren (Kap. 3.1.2.), kamen für die zu untersuchenden Methoden in erster Linie **TOA**, **OTD** und **A-GPS** in die engere Wahl (Kap. 3.3.). Dies hatte ursprünglich durch die zeitlich sehr enge Vorgabe zur Umsetzung ganz gewichtige Gründe. Die Mobilfunkprovider wurden in den USA ex lege alleinig verpflichtet, die vorgeschriebenen Ortungsgenauigkeiten für E-911 zu gewährleisten. Sie konnten aber ihrerseits die Kunden nicht zwingen, dafür neue Mobilgeräte mit entsprechender Hard- und Software anzuschaffen. Daher war man zu Beginn bedacht, Methoden umzusetzen, die mit jedem gerade genutzten Handy funktionierten und TOA ist eine solche.

Schwierig, und Ende der 90er-Jahre stark unterschätzt, war die nötige **Zeitsynchronisation** der an einer TOA-Ortung beteiligten Basisstationen und LMU. Es wurde sogar der Einsatz von Atomuhren, jedenfalls der von hochstabilen GPS-Zeitempfängern an möglichst vielen BTS/LMU diskutiert. Beides wäre extrem hardware- und vor allem kostenintensiv gewesen. Die Fehlerfreiheit der RTD bei den Simulationen war rein theoretisch, sie lieferten mit der damaligen Sendertechnologie in Feldversuchen, auch bei sehr intensivem Einsatz, kaum die geforderten Genauigkeiten für die Ortsbestimmung. D.h., obwohl aus genannten (theoretischen) Gründen Simulationen für **TOA** genauere Ergebnisse hervorbrachten (klar ersichtlich in Tab. 6–2. und Abb. 5–3.), sah man sich in der Praxis gezwungen, stattdessen OTD-Methoden weiter zu verfolgen.

Ortsbestimmungen mittels **OTD** beruhen auf *Zeitdifferenzmessungen* von Signalen, die vom Netz kommen (Abb. 3–18.) und beziehen daher das Mobilgerät bei den Messungen direkt mit ein, was hierfür eine Hard- und Softwaremodifikation notwendig macht. Geräte mit diesen Fähigkeiten mussten erst auf den Markt gebracht werden, im Einsatz befindliche umzubauen rechnete sich kaum. Weiters wurde die Genauigkeit der Zeitnehmung in den Mobilgeräten im Vergleich zu den BTS/LMU anfangs als zu genau erwartet. Auch bei Letzteren ist die Zeitsynchronisation von zumindest drei beteiligten mit guter Schnittgeometrie unterschätzt worden (eine Überbestimmung liegt erst ab vier vor, da je zwei Stationen eine Hyperbel hervorbringen). Jedenfalls führten diese Umstände, insbesondere

das wesentlich überschätzte Genauigkeitspotential von E-OTD, zu beträchtlichen Verzögerungen bei der Einführung von E-911 in den USA und man besann sich auf weitere Möglichkeiten der Ortsbestimmung.

Als dritte in Simulationen näher zu betrachtende Methode wurde somit **Assisted-GPS** (Kap. 3.3.6.) gewählt, da Ortung mittels Satelliten aus Theorie und Praxis bereits gut bekannt war. Der Nachteil der relativ langen Zeitdauer bis zum Vorliegen einer ersten Positionslösung bei einem autarken Empfänger (*Time to First Fix*) wird, wie der Name sagt, größtenteils durch *assistierende Zusatzinformationen*, die in diesem Fall über das Mobilfunknetz dem Empfangsteil im Endgerät zur Verfügung stehen, kompensiert. Mit den zusätzlichen Möglichkeiten einer speziellen Auswertung der GPS-Messdaten und schnelleren Berechnung der Positionen auf einem *Location Server* im Funknetz oder auch im Internet kann die Antwortzeit auf eine ähnliche Dauer wie bei den anderen Ortsbestimmungsmethoden gebracht werden. Bisweilen lässt sich auch an Stellen ein Ergebnis erzielen, wo herkömmliches GPS versagt.

Trotz des beträchtlichen Hard- und Softwareaufwandes für Mobilgeräte gewann A-GPS schnell an Bedeutung, da die 1996 für den Zeitraum der nächsten 10 Jahre angekündigte Abschaltung der *Selective Availability* bereits Anfang Mai 2000 durchgeführt wurde (Kap. 2.2.3.3.). Dies verhalf der gesamten Branche der kleinen mobilen GPS-Empfänger (neben den klassischen Autonavigationssystemen) zu einem großen Entwicklungsschub. Dem verbleibenden Handicap des Versagens dieser Methode in Umgebungen, wo ein regulärer Satellitenempfang erschwert bzw. unmöglich ist (wie z.B. in stark abgeschatteten städtischen Umgebungen, innerhalb von Stahlbetongebäuden, in Tunnels und Tiefgaragen), wird dadurch begegnet, dass A-GPS mit anderen Verfahren zur Ortsbestimmung gut kombiniert werden kann. Dies bestätigten auch unterschiedliche Feldversuche während und nach der Diskussion zu den Simulationsrechnungen (Kap. 5.2.).

Bei einer solchen *Kombination von Ortsbestimmungsmethoden* werden z.B. GPS- und OTD-Messungen zusammen eingesetzt und ausgewertet und bei Bedarf, oder als Fall-Back-Lösung, auf Distanzinformationen aus Signalstärkemessungen zurückgegriffen. In diesem Zusammenhang wird auch von *hybrider Ortsbestimmung* gesprochen (Abb. 5–16.). In Zukunft werden diese Möglichkeiten durch den Einsatz von Mehrfach- und Richtantennen bei den Mobilfunkstandards HSPA+ und LTE(-A) (Kap. 2.1.2.4.) um die Messgrößen AOA und AOD (*Angle of Arrival/Departure*, Kap. 3.3.4.) erweitert. Innerhalb von Gebäuden, ober und unter tags, können zukünftig auch weitere spezielle Techniken außerhalb des zellularen Mobilfunks hinzugezogen werden, wie z.B. WLAN, Bluetooth oder RFID, da einige Funkstandards davon heute schon in Mobilgeräten integriert sind.

Jedenfalls lässt sich deutlich erkennen, dass die Bedeutung, einer Ortsbestimmungsmethode alleine ein gewisses **Genauigkeitspotential** zuordnen zu können, in den Hintergrund getreten ist. Einige werden bereits jetzt in Kombination eingesetzt, um gewisse Genauigkeiten zu erreichen, wie das bei der Standortbestimmung zu E-911 in den USA der Fall ist. Diese Integration unterschiedlicher Methoden wird in Zukunft, unter einer gewissen Dominanz der GNSS (neben GPS wird auch GLO-NASS, Galileo und Compass/Beidou eine Rolle spielen), noch wesentlich an Bedeutung gewinnen (Kap. 3.3.6.).

Betrachtet man **Simulationen zu Ortsbestimmungsmethoden** einzeln für sich, so ist genau darauf zu achten, wie und ob gewisse Bedingungen und Fehlereinflüsse modelliert sind und inwieweit diese

den Gegebenheiten in der Realität bzw. bei einer praktischen Implementierung entsprechen. Aus *Tab. 6–2.* ist ersichtlich, dass die Methode TOA gegenüber OTD genauere Ergebnisse hervorbringt (Spalten TOA vs. OTD Mittelwert), jedoch nur unter Vernachlässigung des RTD-Fehlers, der bei Ersterer stärker zum Tragen kommt. Vergleicht man aber die Differenzen zwischen den Genauigkeiten der Methoden TOA und OTD Mittelwert (Spalte *OTD Mittelw. - TOA*) mit den Variabilitäten der Ergebnisse der verschiedenen Anbieter zu OTD untereinander (Spalte *Diff. OTD*), so ist klar erkennbar, dass *Zweitere* wesentlich größer ausgefallen sind (Spalte $\Delta\%$, zwischen 4 und 495 %, mit nur einer Ausnahme in der Umgebung „*Suburban*“).

Dies lässt sich damit erklären, dass hier die *Genauigkeit einer Simulation*, bei sonst gleichen Voraussetzungen, wesentlich stärker von den simulierten Bedingungen innerhalb eines Umgebungsmodells abhängt, als von der Ortungsmethode selbst. Somit ist umgekehrt zu argumentieren, dass es für die Genauigkeit einer Standortbestimmung wesentlich bedeutsamer ist, exakt festzuhalten, wie und wo in einem bestimmten Umgebungsmodell simuliert bzw. getestet wird, als zu versuchen, sie über die Methode der Ortsbestimmung zu differieren.

6.3. Angaben zu Feldversuchen und Testfeldmessungen

In *Kap. 5.1.* und *Kap. 5.2.* wurden **Feldversuche** zur Ortsbestimmung mit Mobilgeräten präsentiert und diskutiert, wie sie während sowie nach Simulationsrechnungen durchgeführt wurden, um deren Ergebnisse zu evaluieren und weiters die theoretischen Modelle durch die Gegebenheiten in der Praxis zu korrigieren bzw. auszubauen. Anfänglich stand die Hauptaufgabe im Vordergrund, auszuloten, welche Ortsbestimmungsmethoden am ehesten die Genauigkeitsvorgaben zu E-911 in den USA erfüllen (*Kap. 3.1.2.*) und daher als Erstes standardisiert und in den Mobilfunknetzen implementiert werden sollen. Im Zuge fortlaufender Feldversuche erkannte man jedoch, dass die Schwierigkeit in erster Linie in der *Modellierung der Mehrwegeausbreitung* liegt (*Kap. 2.1.4.2., Abb. 2–29.*).

Diese tritt jedenfalls auf, wenn keine *Sichtverbindung* zwischen Sende- und Empfangsantenne besteht (*Non Line of Sight*, NLOS). Sie entsteht aber auch bei direkter Verbindung (*Line of Sight*, LOS), da Mobilfunk meist über einen ganzen Sektor abgestrahlt wird und heute noch keine spezielle Richtcharakteristik aufweist. Der *klassische Ansatz* in der **Modellierung von Mehrwegeeffekten** ging von LOS-Bedingungen aus und versuchte im Nachhinein die entstandenen Verfälschungen durch spezielle Methoden, abhängig vom jeweiligen Umgebungsmodell, bestmöglich wieder auszubessern. Unter gewissen Umständen kann dabei jedoch eine weitere Verschlechterung der Ergebnisse eintreten. *Neuere Ansätze* (z.B. beschrieben in (*Seow, 2009*)) gehen a priori von NLOS-Umgebungen aus und versuchen anstatt eines Zwei-Stufen-Verfahrens diese Mehrwegeeffekte in einer gesamtheitlichen Modellierung abzubilden. Dieser Weg ist auch für zukünftige Mobilfunkentwicklungen mit neuen Antennensystemen (z.B. Felder und solche mit unterschiedlich starken Richteigenschaften) besser geeignet.

Weiters war schon bei Simulationsrechnungen auszumachen, dass die Variation der Genauigkeitsangaben innerhalb eines Umgebungsmodells (wie z.B. Stadtzentren, Vorstadt, ländliche Gebiete), bei sonst gleichen Bedingungen (Anzahl empfangbarer Basisstationen, Geschwindigkeit des Mobilgerä-

tes etc.), zwischen unterschiedlichen Anbietern der gleichen Methode systematisch größer war, als zwischen verschiedenen Ortsbestimmungsmethoden (Tab. 6–2.). Dies gab Anlass, mehr über die *Charakteristik von Umgebungsmodellen* nachzudenken, Einflussfaktoren von verschiedenen Teststandorten herauszufinden und dies intensiver mit Feldversuchen und Testmessungen zu begleiten.

Werden im Mobilfunk neue Netztechnologien erprobt (wie z.B. neue Antennen) und innerhalb derer Funktionalitäten wie die genaue Ortung von Mobilgeräten, so lassen sich drei mehr oder minder verschiedenartige Szenarien unterscheiden. *Ersteres* sei mit „**Feldversuche**“ bezeichnet. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass sie i.A. mit proprietärer Hardware an den Sendern und Empfängern in einem geographisch kleinen Bereich (typisch $< 10 \text{ km}^2$) mit nur wenigen Basisstationen bzw. *LMU* (meist < 50) durchgeführt werden. Als Mobilgeräte kommen mitunter größere Boxen mit speziellen Antennen aus Spezialanfertigungen zum Einsatz, die mit Handys, wie man sie kommerziell erhält, nicht vergleichbar sind und Ähnliches gilt für die darauf befindliche Software.

Feldversuche dienen hierbei der Erprobung theoretischer Ansätze und Modelle sowie zum Abgleichen von Parametern aus diversen Simulationsrechnungen. Ihre Ergebnisse zu Ortsbestimmungsmethoden sollen erste Einschätzungen liefern und sind i.d.R. weder optimiert noch aus bestehenden Standards hervorgegangen. In den *Kap. 5.1.2.* und *Kap. 5.2.* sind typische Feldversuche dieser Art beschrieben (einige entsprechen schon den u.a. Testmessungen), mit Angaben zu Genauigkeiten, Ausfällen und Umgebungssituationen.

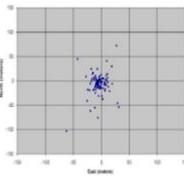
Das *zweite Szenario* zur praktischen Erprobung von Ortsbestimmungsmethoden bilden „**Test(feld)-messungen**“, mit einer Ausdehnung von typischerweise $> 10 \text{ km}^2$, d.h. vergleichbar mit z.B. Teilen eines Wiener Gemeindebezirkes, und einer größeren Anzahl von Basisstationen (bis zu *100*). Kennzeichnend für Testmessungen dieser Art ist, dass sie meist mit ausgereifter Hardware in den Sendeanlagen durchgeführt wird. Diese ist bereits kommerziell erhältlich und verbleibt wegen der großen Anzahl für den späteren Realeinsatz überwiegend in den BTS bzw. wird nur geringfügig adaptiert und mit neuer Software ausgestattet. Auf Seite der Mobilgeräte werden jedoch mehrheitlich solche eingesetzt, die auf Einzelanfertigungen beruhen oder vom technischen Design jenem kommerzieller Handys entsprechen, aber nicht im Handel verfügbar sind.

Ergebnisse solcher *Testfeldmessungen* besitzen im Vergleich zu den einfachen *Feldversuchen* eine höhere Aussagekraft, da die eingesetzte Technologie in Hard- und Software bereits optimiert ist und vorwiegend von kommerziellen Produktionsschienen stammt. Die Zeitspanne bis zur Freigabe und regulären flächendeckenden Implementierung in ein Mobilfunknetz kann jedoch noch Monate bis Jahre betragen.

Als *drittes Szenario* lassen sich „**Teilimplementierungen**“ mit neuer und schon in Mobilfunknetzen im Einsatz befindlicher Technologie anführen. Sie entsprechen von der Größe her mindestens jenen der Testfeldmessungen und setzen Endgeräte ein, die im Handel bereits erhältlich sind, meist jedoch nur in geringen Stückzahlen. Die Dienste solcher Implementierungen stehen oft nur einer kleinen Anzahl von Kunden zur Verfügung. Ein klassisches Beispiel dafür sind sogenannte „*Friendly User Programme*“, die einige Monate dauern, um Methoden sowohl technisch als auch von der Kosten-Nutzen Seite her zu optimieren, bevor sie im gesamten Versorgungsgebiet bereitgestellt werden.

Solche Programme laufen gerne bei einem Generationswechsel im Mobilfunk. Wenn sich z.B. Ortsbestimmungstechnologien in einem GSM-Netz schon im Einsatz befinden und auf jene Teile im Netz zu erweitern sind, die mit UMTS arbeiten oder zukünftig auf LTE bzw. LTE-Advanced beruhen. Er-

gebnisse von *Teilimplementierungen* unterscheiden sich hinsichtlich Genauig- und Zuverlässigkeit kaum mehr von jenen des darauffolgenden Regelbetriebs und Verbesserungen ergeben sich mit dem laufenden Produktzyklus der jeweiligen Ortungstechnologie.

Methode	Umgebungsmodell	Geschw. MS [km/h]	Anz. BTS	Anz. Ortungen	Genauigkeit		Situation Test-standort (Foto)
	Ort / Beschreibung				Maß (%) / Quote [%]	[m]	Streubild
OTD	Suburban	0 – 60	3 – 8	550	– (67) / –	239	–
	Helsinki Stadt, Finnland / 5 km ² , 2-3 stöckige Gebäude, GSM-900						–
A-GPS	–	0	–	–	<i>1dRMS</i> (68,3) / 100	15	
	städtische Straße, Shinbashi, Tokyo, Japan / 2-10 stöckige Gebäude, schmale Straßen und Gassen; Antennenhöhe: 1 m						
A-GPS	–	0	–	–	– (–) / 98,1	31,5	
	Restaurant Chevaux de Marly, Paris, Frankreich / im Gebäude, GSM						–

Tab. 6–3.: Beispiele zur Dokumentation von Feldversuchen und Testfeldmessungen (Autor)

Die konkreten Angaben in Bezug auf die **Qualität der Ortsbestimmungen** unterscheiden sich von Fall zu Fall wesentlich, egal ob es sich um *Feldversuche*, *Testfeldmessungen* oder *Teilimplementierungen* handelt. Im Folgenden sei aufgezählt, was in Dokumentationen dazu präsentiert und was zu einer objektiveren Beurteilung bzw. Vergleichbarkeit oft verschwiegen wird oder im ganzen Szenario einfach fehlt. Tab. 6–3. zeigt auszugsweise einige Daten dafür aus Beispielen, wie sie in Kap. 5. diskutiert wurden.

- **Beschreibung der Genauigkeit:** i.d.R. *Maßzahlen* in Meter, Bereichsangaben von – bis, nicht immer eine *statistische Wahrscheinlichkeit* in Prozent (es wird oft 67% stillschweigend vorausgesetzt bzw. angenommen), bisweilen ist das *Genauigkeitsmaß* direkt benannt (in den USA nach Anforderungen der FCC zu E-911 vorerst *1dRMS*, später empirische Regeln; in der EU und sonst sehr unterschiedlich);

- **Behandlung von Ausfällen** (wenn eine Ortsbestimmung, aus welchen Gründen immer, kein Ergebnis hervorbringt): in den USA indirekt als „Treffer-Quote“ (*yield*) prozentuell ausgedrückt, da sie in die Genauigkeitsangaben mit einbezogen wird; bei strengen Genauigkeitsmaßen nicht verwertbar und daher oft auch nicht dokumentiert;
- **Visualisierung mittels Streubildern**: selten vorhanden und wenn, dann ist meist nicht festgehalten, ob der *Mittelpunkt* unabhängig bestimmt wurde (z.B. durch eine terrestrische Einmessung, GPS, photogrammetrisch oder per Laserscanning); Streubilder können gut auf systematische Einflüsse und grobe Fehler hinweisen;
- **Klassifizierung von Umgebungsmodellen**: wenn überhaupt, dann nur mit Worten titulierte und beschrieben (städtisch, Vorstadt, Land usw.; meist werden die englischen Begriffe direkt übernommen: *bad urban* – z.B. New York Manhattan, Paris La Défense oder auch tlw. Wien Donauey –, *urban*, *suburban*, *rural*, *indoor urban* usw. mit Zusatzinformationen wie „zweistöckiges Bürogebäude, Ziegelbauweise, in einem Raum des 1. Stockes“); selten sind Teststandorte mit Fotos dokumentiert bzw. es ist darauf nicht zu erkennen, wo genau sich der Empfänger befand und wie die weitere Umgebung aussieht;
- **Länge der tolerierten Antwortzeiten**: diese spannen bis zum Vorliegen jener Positionslösungen, die zum Ermitteln der Genauigkeitsangaben dienen, werden meist mit *10-30 Sek.* angenommen, was jedoch kaum dokumentiert ist; einen Teil der Antwortzeit wiederum repräsentiert die reine *Messzeit* (mit Mobilfunk- und Satellitensignalen), der Rest wird benötigt für die Übertragung von Daten und Berechnungen; in Zusammenhang mit der Antwortzeit steht auch die Frage ob und wie viel „*statistische Korrektur*“ (z.B. durch Mittelbildungen) bereits erfolgte, bevor eine Position als „*Einzelresultat*“ angegeben wird;
- **Verteilung der Teststandorte innerhalb eines Umgebungsmodells**: ist i.d.R. nicht bekannt; könnte rasterartig, nach einem Zufallsprinzip, mit Stichproben oder einer Mischung von allen erfolgen, mit bestimmten Regeln und Bestimmungen, wie mit Sonderflächen und Ausnahmesituationen im Versorgungsgebiet eines Mobilfunkanbieters umgegangen wird (z.B. Seen, Flussläufe, Wälder, U-Bahnen, Tiefgaragen, militärische Anlagen etc.);
- **Sichtweise bzw. Profil für die Ortsbestimmung**: ist die Empfangsantenne in Ruhe bzw. geringfügiger Bewegung (auch als „nomadische Nutzung“ beschrieben, d.h. maximal *5-15 km/h*, also typischerweise aus der Sicht eines *Fußgängers*) oder werden auch höhere Geschwindigkeiten miteinbezogen (z.B. eines *Rad-* oder *Kraftfahrers*; der Standard GSM hat eine Spezifikation bis zu *250 km/h*); damit zusammen hängt i.d.R. auch die Höhe der Empfangsantenne (meist *1-2 m*, könnte aber auch *3-4 m* betragen, was ca. einer Geschosshöhe entspricht, und Vielfache davon);

6.4. Recherchierte Vergleichsangaben aus der Literatur

Der letzte Abschnitt dieses Kapitels präsentiert eine Sammlung ausgewählter Beispiele von Qualitätsbeschreibungen in Kurzform, wie sie zu *unterschiedlichen Ortsbestimmungsmethoden* in Lehrbüchern, Fachartikeln, White Papers, wissenschaftlichen Arbeiten und der Presse gemacht wurden. Sie

sollen einerseits die in diesem Kapitel beschriebenen Sachverhalte ergänzen, andererseits neues Zahlenmaterial von unterschiedlichen Seiten und Perspektiven bringen. Die Beispiele sind in *Tab. 6–4* zusammengestellt und mit einigen Kommentaren ergänzt.

Zu ⁽⁵⁷⁾ sei hinzugefügt, dass die *Simulationsergebnisse* auf einer realen Laborumgebung mit Ausmaßen von ca. $30 \times 30 \text{ m}$ mit drei fixen Basisstationen, NLOS-Bedingungen (Reflexionen und Beugungen an Stahlbetonhindernissen) und einem konventionellen Simulationsalgorithmus mit zusätzlichem Schema zur Reduzierung von Effekten der Mehrwegeausbreitung beruhen. Die *Genauigkeitsangabe* zu TOA wurde aus einem Schnitt von je 10.000 zufällig verteilten Standorten für die Mobilstation, bei einem angenommenen Fehler σ für die Distanz von $1 - 5 \text{ m}$ in Ein-Meter-Schritten, ermittelt.

Methode	Genauigkeit nach Umgebung				Fehlermaß	Wahrsch. [%]	Netz	Quelle	Anmerkung
	Stadt	Vorstadt	Land	in Gebäuden					
Cell-ID	150 m – 1 km	1 – 10 km	1 – 35 km	keine Änderung	–	67	GSM	Lehrbuch mit Referenzen aus wissenschaftlichen Arbeiten ⁴⁹	
	–		1 – 35 km	–	–	–	GSM	Fachbuch mit Referenzen aus wissenschaftlichen Arbeiten ⁵⁰	Spezialzellen an Küsten: bis zu 120 km
	Mikrozelle: 50 – 500 m Makrozelle: 500 m – 5 km		–	Picozelle: 10 – 50 m	–	–	UMTS		
	100 m – 35 km			–	–	–	GSM	Vortragsunterlagen zu Seminar auf Universität, keine Quellenangaben ⁵¹	
	100 m – 2 km			–	–	–	UMTS		
	100 m – 3 km			–	–	–	–	Artikel in Fachmagazin mit Referenzen aus wissenschaftlichen Arbeiten ⁵²	
	ca. 300 m	–	ca. 10 km	–	–	–	–	journalistischer Artikel im Internet, keine Quellenangaben ⁵³	
	100 m – 30 km			–	–	–	–	Web-Seite eines technischen Kompendiums, keine Quellenangaben ⁵⁴	
50 m – 1 km	2 – 10 km	> 10 km	–	–	–	–	Fachbuch mit Referenzen aus wissenschaftlichen Arbeiten ⁵⁵		
RSS	150 m			–	–	–	GSM	⁽⁵¹⁾	
	150 m			–	–	–	UMTS		
	20 – 80 m	–	–	–	–	–	GSM	⁽⁵³⁾	
AOA	300 m		–	–	–	–	i.A. 2G	⁽⁵⁰⁾	
	125 m			–	–	–	GSM	⁽⁵¹⁾	
	125 m			–	–	–	UMTS		
	100 – 200 m			–	–	–	–	⁽⁵²⁾	
	100 – 200 m			–	–	–	–	Vortragsunterlagen einer Firma auf Konferenz ⁵⁶	

⁴⁹ (Kahmen, 2006), Kap. 18.2., verfasst von G. Retscher

⁵⁰ (Brimicombe und Li, 2009), Kap. 6.

⁵¹ (Gutmann, 2007)

⁵² (Wunderlich et al., 2006)

⁵³ (Schulzki-Haddouti, 2006)

⁵⁴ (Schnabel, 2014)

⁵⁵ (Küpper, 2005)

⁵⁶ (Wang, S. et al., 2008)

TOA	125 – 200 m			–	–	–	i.A. 2G	(⁵⁰)	
	125 m			–	–	–	GSM	(51)	
	100 m			–	–	–	UMTS		
	100 – 200 m			–	–	–	–	(52)	
	27 m			–	RMS	68,3	Frequenz zw. GSM-900 u. GSM-1800	als Fachbuch publizierte Dissertation ⁵⁷	
E-OTD	50 – 150 m	50 – 150 m	50 – 300 m	geringe Verschlechterung bei guter Signalausbreitung	–	67	GSM	(49)	
	50 – 150 m			–	–	–	i.A. 2G	(50)	
	50 – 150 m			–	–	–	GSM	(51)	
	5 – 20 m			–	–	–	UMTS		
	50 – 200 m			–	–	–	–	(52)	
	50 – 200 m			–	–	–	GSM	(56)	
	bis zu 30 m			–	–	–	–	(54)	
50 – 300 m	50 – 250 m	50 – 150 m	–	–	–	–	(55)		
TDOA	50 – 150 m	50 – 150 m	50 – 300 m	geringe Verschlechterung bei guter Signalausbreitung	–	67	GSM	(49)	
	50 – 200 m			–	–	–	2G	(50)	
	20 m			–	–	–	3G		
	50 – 150 m			–	–	–	GSM	(51)	
	5 – 20 m			–	–	–	UMTS		
	270 – 380 m			–	–	–	GSM	Lehrbuch mit Referenzen aus wissenschaftlichen Arbeiten ⁵⁸	TDOA ermöglicht in zellularen Netzwerken i.A. genaueste Ergebnisse
	20 – 27 m			–	–	–	UMTS		
	100 – 200 m			–	–	–	–	(52)	
	50 – 200 m			–	–	–	UMTS	(52)	
	< 50 m			–	–	–	–	(56)	
	20 – 80 m	–	–	–	–	–	GSM	(53)	
	–	–	2 m	–	–	–	UMTS		
40 – 50 m	40 – 50 m	50 – 120 m	–	–	–	–	(55)		
RTT	40 m			–	–	–	UMTS	(51)	

⁵⁷ (Seow, 2009)⁵⁸ (Hofmann-Wellenhof et al., 2003)

A-GPS	30 – 100 m	20 m	5 – 10 m	Messungen in der Nähe von Fenstern möglich	–	67	GSM	(⁴⁹)	
	1 – 15 m			–	–	–	i.A. 2G	(⁵⁰)	
	5 – 30 m			–	–	–	CDMA	(⁵⁶)	
	30 – 150 m	20 – 100 m	10 – 40 m	–	–	–	–	(⁵⁵)	
A-FLT	50 – 200 m			–	–	–	i.A. 2G	(⁵⁰)	
	50 – 200 m			–	–	–	–	(⁵²)	
	50 – 200 m			–	–	–	CDMA	(⁵⁶)	
	50 – 200 m			–	–	–	–	(⁵⁵)	
E-FLT	250 – 350 m			–	–	–	i.A. 2G	(⁵⁰)	
	250 – 350 m			–	–	–	CDMA	(⁵⁶)	
	250 – 350 m			–	–	–	–	(⁵⁵)	

Tab. 6–4.: Beispiele zu Genauigkeitsangaben für unterschiedliche Ortsbestimmungsmethoden (Autor)

7. Resultate und weiterführende Aufgaben

In diesem letzten Kapitel werden die Aussagen der *Kap. 3.* bis *Kap. 6.* bezüglich der These aus *Kap. 1.1.* zusammengefasst, entsprechende Schlüsse gezogen und ein Blick in die Zukunft getan. Dabei ist auch festgehalten, welche Punkte noch untersucht und weiterentwickelt werden können bzw. müssen, um einen Fortschritt bei der Gewinnung und Beurteilung von Qualitätsangaben zu Ortsbestimmungen mit mobilen Geräten zu erzielen.

7.1. Vorausgehende Zusammenfassung

Eingangs sollen einige **grundsätzliche Ergebnisse** angeführt sein, die zu erzielen waren, da diese Arbeit auf zwei Zeitabschnitte von Untersuchungen und Recherchen zurückgreifen konnte, die einen Abstand deutlich über den bisher durchschnittlichen Produktzykluszeiten in der Mobilfunkbranche haben. Dies betrifft sowohl den Bereich der Endgeräte als auch den der Netze. Wichtige Erkenntnisse daraus waren zu Beginn dieser Arbeit nicht absehbar, beeinflussen die weitere Entwicklung in Hinblick auf Ortsbestimmungsmethoden jedoch wesentlich:

- *Mobilfunknetze der „3. Generation“*, sowohl im marketingmäßigen Sinne als auch gemäß ITU-Festlegung, sind mehr als 10 Jahre nach Einführung bzw. Lizenzvergabe laufend nur *Parallelsysteme* zu den bestehenden Netzen der 2. Generation. Dies gilt insbesondere in Europa mit UMTS und GSM, die beide inzwischen sehr gut standardisiert, ausgereift und erweitert sind. Dennoch wurden die Lizenzzeiten für GSM z.B. in Österreich bis 2015 und mittels Refarming bis 2034 verlängert bzw. versteigert (*Tab. 2-1.*). Ein Parallelbetrieb mit Multimode-Geräten beeinflusst jedoch die Mehrheit der Ortungsmethoden hinsichtlich der Genauigkeit wesentlich (*Kap. 5.3.*), da nicht garantiert werden kann, jederzeit und an jedem Ort das 3 G-Netz des jeweiligen Anbieters exklusiv zur Verfügung zu haben. Diese Parallelitäten werden mit der Liberalisierung der Frequenzbereiche und laufenden Inbetriebnahme von LTE(-A)-Netzen noch weiter zunehmen (für Österreich z.B. GSM-900/1800 vs. UMTS-900/2100 vs. LTE-800/900/1800/2100/2600 ff.).
- Die *Entwicklung und Einführung neuer GNSS* wurde und wird sowohl aus technischer, wirtschaftlicher als auch organisatorischer Perspektive entschieden unterschätzt. Die Gründe dafür seien hier nicht weiter erörtert, als Beispiele können das europäische Galileo und das amerikanische GPS III genannt werden. Ersteres sollte nach langer Vorbereitung, diversen Systemerweiterungen und etlichen Verzögerungen bereits 2008 in Vollbetrieb gehen (*Wikipedia, 2014f*). Mit September 2015 ist jedoch noch kein Teilbetrieb mittels der im Orbit befindlichen Test-, Validierungs- und regulären Satelliten freigegeben worden. GPS III wird sich wegen beträchtlicher Schwierigkeiten bei der Ablöse veralteter Komponenten des aktuellen GPS II um ca. 10-15 Jahre gegenüber den ursprüng-

lichen Plänen verzögern (GAO, 2009; Persson, 2009; Zogg, 2009). Alle Methoden zur Ortsbestimmung beruhend auf einer Variante von (A-)GNSS sind davon direkt betroffen⁵⁹.

- Bestimmte *Ortsbestimmungsmethoden*, die nach jahrelangen umfangreichen Simulationen und Feldversuchen als sehr leistungsfähig galten, Standardisierungsprozesse durchliefen und von der FCC ursprünglich sogar zu jenen gezählt wurden, für die restriktivere Genauigkeitsvorgaben zu E-911 gelten („*Handset-Based*“, Tab. 3–1.), mussten von Mobilfunkanbietern in den USA durch eine gänzlich andere Technologie ersetzt werden. Letztlich ist dies einfach damit zu begründen, dass die prognostizierten Genauigkeitswerte in der netzweiten Praxis bei weitem nicht zu erreichen waren. Als Beispiel sei E-OTD angeführt (Kap. 3.3.5.), ein Downlink-Verfahren in GSM-Netzen, das vorrangig der Methode UL-TDOA, teilweise auch A-GPS und kombinierten Verfahren, weichen musste. Dies zeigt u.a. sehr eindrucksvoll, dass bestimmte Genauigkeitsbereiche a priori nicht an gewisse Ortsbestimmungsmethoden geknüpft werden können.
- Das freie Spiel der Marktwirtschaft und das Prinzip der „Freiwilligkeit“ haben in Europa, trotz jahrelanger anderslautender Vorhersagen, nicht annähernd denselben Bereich an Genauigkeit bei Ortsbestimmungsmethoden für LBS gebracht, wie in den USA, wo es vorgeschriebene Werte für den mobilen Notruf gibt. Dies gilt insbesondere in Hinblick auf E-112 oder eCall, wo einzig auf die Methoden Cell-ID bzw. GNSS (sofern verfügbar) abgestellt wird. Dabei ist zu bedenken, dass in Europa die Einheitlichkeit sowie die Standards der Mobilfunknetze über Generationen hinweg (GSM, UMTS und sukzessive LTE(-A)) weit über jenen in den USA liegen. *Vorgaben zur Genauigkeit für die Standortbestimmung* bei mobilen Notrufen führten jedoch überhaupt erst zu einer Auseinandersetzung mit der Problematik einer flächendeckenden, möglichst konsistenten, Ortung, zumindest im Versorgungsbereich von Mobilfunknetzen. Lösungswege verliefen inzwischen (auch weltweit betrachtet) wesentlich komplexer als lange angenommen und sind bis heute nicht annähernd zu Ende geführt.

7.2. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Diese Arbeit soll einen Beitrag leisten zur Beschreibung und Darstellung der *Qualität*, insbesondere der *Genauigkeit*, von Ortsbestimmungsmethoden für Location Based Services. Diese LBS werden bevorzugt auf mobilen Geräten betrieben und der Vorgang der Lokalisierung bedient sich stets auf die eine oder andere Weise einer Signalübertragung per Mobilfunk- bzw. Satellitennetz. Für das Verständnis wurden zuerst ausgewählte Grundlagen aus dem Mobilfunk und den Satellitennavigationssystemen sowie deren Entwicklungen erörtert (Kap. 2.). Anschließend sind ein Einblick in LBS mit

⁵⁹ Im Jahre 2004 einigten sich die Verkehrsminister der EU-Mitgliedsstaaten und Vertreter der Industrie in Brüssel auf eine weitere Finanzierung von Galileo. Die Beteiligten zeigten sich zuversichtlich, dass Galileo noch vor der dritten Generation von GPS genutzt werden könne und der damalige EU-Verkehrskommissar Jacques Barrot meinte: „Nächstes Jahr werden wir den Start der ersten Satelliten sehen“. Eine Nutzung des Systems sollte ohne Verzögerung Ende 2008 möglich sein (Braun, 2004).

Tatsächlich wurde der erste Testsatellit (Giove-A1) am 28. Dez. 2005 erfolgreich im All ausgesetzt, der zweite (Giove-B) bereits mit großer Verspätung am 26. Apr. 2008. Das Programm für die Validierungssatelliten kam in beträchtliche Schwierigkeiten, konnte jedoch alle vier in ihren geplanten Bahnen positionieren (Okt. 2011 und Okt. 2012). Die anfängliche Gruppe der regulären Satelliten erfuhr folglich einen weiteren Verzug. Die Aussetzung der ersten beiden am 22. Aug. 2014 konnte zudem nicht korrekt abgeschlossen werden. Dies hatte zur Folge, dass sie trotz intakter Funktionen in nicht vorgesehene Flugbahnen gelangten und somit weitere Verzögerungen für die nächsten Satellitenstarts entstehen.

detaillierter Darstellung der Rahmenbedingungen zu E-911 und E-112 gegeben und bestehende Ortsbestimmungsmethoden erläutert worden (*Kap. 3.*). Es folgte die Beschreibung eigener GPS-Testmessungen mitsamt Berechnungen von Transformationen und Fehlermaßen, inklusive vorhergehender theoretischer Grundlagen (*Kap. 4.*). Weiters wurde eingegangen auf veröffentlichte Simulationsrechnungen und Feldversuche zu unterschiedlichen Lokalisierungsmethoden sowie auf spezifische Fehlereinflüsse bei der Ortsbestimmung mit Mobilfunksignalen (*Kap. 5.*). In *Kap. 6.* sind vormals gemachte Aussagen gegenübergestellt und vertieft diskutiert worden. Ergänzungen erfolgten durch aus unterschiedlicher Fachliteratur entnommenen Beurteilungen hinsichtlich der Genauigkeit einzelner Ortungsmethoden.

Im Folgenden soll nun festgehalten werden - mit Blick auf die in *Kap. 1.1.* angeführte *These* - zu welchen **Ergebnissen** diese Arbeit gekommen ist und welche **Schlüsse** daraus zu ziehen sind. Abschließend sind einige **weiterführende Überlegungen** für die Zukunft gegeben, insbesondere in Hinblick auf die Problematik der *Standortbestimmung bei erweiterten Notfalldiensten* wie E-911 und E-112.

Zahlenwerte bei Genauigkeitsangaben von Ortsbestimmungen sind i.d.R. statistischer Natur und gewinnen, abgesehen von allen weiteren Einflussfaktoren, erst eine Aussagekraft in Verbindung mit einem eindeutigen **Genauigkeitsmaß** und einem **Wahrscheinlichkeitsniveau**, auf das sich die Werte beziehen. *Mathematisch strenge Maße*, wie z.B. der *dRMS*, sind zwar nicht für jedermann gleichermaßen verständlich, besitzen jedoch den Vorteil, dass sie eindeutig definiert sind. *Empirische Maße*, nach bestimmten Regeln festgelegt (z.B. *CEP_{Daten}*, *FCC 67*), sind einfacher zu handhaben, lassen jedoch einen größeren Interpretationsspielraum offen (*Kap. 4.2.*). Ohne Maße sind Werte nicht seriös vergleichbar, auch wenn eine bestimmte Wahrscheinlichkeit zur Verfügung steht. Unterschiedliche Maße können, selbst mit gleichem statistischem Niveau, sehr verschiedene Werte hervorbringen, deren Vergleich oft problematisch ist (*Abb. 4-13.*, *Abb. 4-14.* und *Anhang 1 - Visualisierung der Fehlermaße*).

Die *Ergebnisse der Testmessungen* aus *Kap. 4.3.3.* haben z.B. gezeigt, dass zwischen *CEP $\sigma_{Y,X}$* und *CEP_{Daten}*, beide zu 50%, zweiteres Maß jedoch empirisch ermittelt, ein Unterschied von 3,0 m (das sind 41% zugunsten des Zweiteren) liegen kann (*Anhang 2 - Ergebnisse*). *CEP 67%*, aus den $\sigma_{Y,X}$ abgeleitet, und *FCC 67*, ebenfalls zu 67%, aber nach bestimmten Regeln mit der Ausfallrate vermischt, ergaben je nach Empfänger sehr unterschiedliche Abweichungen von 0,1 m (1%, bei Trimble) und 2,8 m (33%, bei Garmin), beide zugunsten des Maßes nach Vorgaben der FCC (*Tab. 6-1.*). Daraus lässt sich schließen, dass die eindeutige Festlegung eines Maßes zu Genauigkeitsangaben als Voraussetzung gesehen werden kann. In Verbindung mit einem statistischen Niveau ist die Art, wie ein Maß gebildet wird, von entscheidender Bedeutung. Ohne eine genaue Kenntnis davon, insbesondere wenn Maße gewechselt werden, sind objektive Vergleiche nicht möglich.

Bei der Festlegung eines Standortes werden Genauigkeitsangaben immer in Bezug auf ein einheitliches *Koordinaten-* bzw. *Referenzsystem* getroffen, auch wenn dies bei vielen Erörterungen mitunter nicht offenkundig ist. Erst in Verbindung mit physischen Anhaltspunkten auf der Erdoberfläche, wie z.B. Festpunkten, die in den unterschiedlichen Landesvermessungssystemen der einzelnen Staaten geführt werden und worauf weiters alle Grenzfestlegungen in eindeutig definierter Weise beruhen, gewinnen solche Angaben eine reale Ausprägung. Insbesondere beim Einsatz von GNSS, z.B. bei

A-GPS-Methoden oder zur Zeitsynchronisation bei Laufzeitmessungen (*Kap. 3.3.6.*, *Kap. 3.3.5.*), spielen globale und lokale Systeme zusammen und entsprechende **Transformationen** sind notwendig.

Diese mathematischen Operationen können auf verschiedene Art und natürlich auch mit unterschiedlicher Genauigkeit durchgeführt werden. Vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass hierbei, bezogen auf Österreich, durchschnittliche *Differenzen in der Lage* zwischen *1,5 m* (strenge Umrechnung nach Helmert), *12 m* (näherungsweise nach Molodenski) und *160 m*, bei völliger Vernachlässigung der unterschiedlichen Form und Lagerung der Ellipsoide bei WGS 84/ITRS (GPS) und MGI (Landesvermessung und Kataster), entstehen (*Kap. 4.1.2.* und *Kap. 6.1.*). Dies hat jedenfalls Einfluss auf die Gesamtgenauigkeit einer Standortangabe und ohne ein Wissen über Art und Umfang von durchgeführten Transformationen ist eine Beurteilung nur bedingt möglich.

Eine Analyse von **Simulationsrechnungen** (*Kap. 5.1.*), die ursprünglich durchgeführt wurden zur Unterstützung der Entwicklung unterschiedlicher Ortsbestimmungsmethoden, hat ergeben, dass die Genauigkeit wesentlich stärker von unterschiedlichen Standortsituationen innerhalb eines Umgebungsmodells abhängt als von der Methode selbst. Die Unterschiede der Beispiele aus *Tab. 5–2.*, zusammengefasst in *Tab. 6–2.*, ergeben zwischen den verschiedenen Lösungsanbietern eine im Schnitt um *83 %* größere Differenzierung innerhalb einer Umgebung (OTD, bei sonst gleichen Bedingungen), als zwischen den zwei untersuchten Methoden (TOA und OTD).

Dies ist aus zweierlei Gründen von wesentlicher Bedeutung. Zum einen wird in den USA immer noch eine „**Klasseneinteilung**“ unter den verschiedenen Ortsbestimmungsmethoden für E-911 vorgenommen (*Network- und Handset-Based*) und diesbezüglich sind auch unterschiedliche Genauigkeitswerte gefordert (*Tab. 3–1.*). Zum anderen sind keine Rahmenbedingungen festgehalten, unter denen diese Werte zu ermitteln bzw. einzuhalten sind. Sie galten ursprünglich im gesamten Versorgungsbereich eines Netzanbieters, der auch E-911 zu seinen Diensten zählt, und wurden mit den Forderungen der FCC aus dem Jahre 2007 schrittweise soweit präzisiert, dass sie sich im Durchschnitt auf die Einzugsfläche einer Notrufannahmestelle (PSAP) beziehen müssen (*Tab. 3–2.*).

Sowohl Simulationsrechnungen als auch jahrelanger praktischer Einsatz in unterschiedlichen Mobilfunknetzen haben gezeigt, dass sich *Genauigkeitsbereiche* primär nicht an verschiedene Ortsbestimmungsmethoden, wie sie in *Kap. 3.3.* erörtert sind, knüpfen lassen, wenn auch mit bisweilen anderen Ergebnissen (*Kap. 6.2.* und *Kap. 6.3.*). Annahmen aus der Theorie und Simulationen stellten sich später in realen Netzumgebungen wesentlich anders dar, wie das z.B. bei der Methode E-OTD besonders deutlich ausgefallen ist.

E-OTD wurde ursprünglich als „*Handset-Based-Technik*“ eingestuft, womit auch die restriktiveren Genauigkeitsvorgaben der FCC zur Anwendung kamen. Später musste sie jedoch durch andere Technologien ausgetauscht werden, da die Anforderungen in der Praxis nicht annähernd zu erreichen waren. Dadurch wurde jedoch die Zuteilung zu einer „Genauigkeitsklasse“ obsolet. Die fortlaufende Entwicklung und Integration bei den Ortsbestimmungsmethoden (meist eine Variante von A-GNSS verbunden mit Mobilfunktechniken beruhend auf Laufzeitmessungen, wie UL-TDOA oder A-FLT) zeigt auch, dass eine Trennung bzw. Einteilung auf diese Art nicht sinnvoll ist, wenn man Genauigkeiten betrachtet.

Vielmehr ist z.B. zu erkennen, dass selbst innerhalb des Versorgungsgebietes einer einzelnen Notrufannahmestelle die *Bedingungen für eine Standortbestimmung* höchst unterschiedlich ausfallen kön-

nen (Kap. 3.1.2.). Ein Mobilfunkanbieter hat im Gebiet einer solchen Annahmestelle die Genauigkeitsanforderungen der FCC jedoch nur im Durchschnitt zu erfüllen, wenn er in diesem sein Netz mit E-911-Diensten anbieten will. Es liegt aber einzig im Ermessen der einzelnen Netzbetreiber, an welchen Stellen Testmessungen durchgeführt werden und wo nicht. Eine Gewichtung zwischen verschiedenen „**Umgebungsmodellen**“ wie z.B. „Urban“ oder „Rural“ sowie Situationen innerhalb oder außerhalb von Gebäuden (Tab. 5–2.) obliegt zur Gänze dem jeweiligen Netzbetreiber und ist behördenseitig nicht reglementiert. Würde man demnach die Genauigkeit der Standortbestimmung nach FCC-Kriterien in einem PSAP-Gebiet von mehreren völlig unabhängigen Testteams feststellen lassen, so kämen auch mehrere unterschiedliche Ergebnisse zustande.

Des Weiteren gibt es auch keine vorgegebenen Grenzwerte zu **Gesamtantwortzeiten** einer Standortbestimmung (Kap. 5.3.). D.h. nach wie vielen Sekunden oder Minuten, z.B. nach Betätigung des Notrufes über E-911, die Ortsangaben bei der zuständigen Notrufannahmestelle eingelangt sein müssen. Je länger diese Antwortzeit betragen darf, umso mehr Zeit steht für die Ortsbestimmung selbst zur Verfügung, da die Übertragungszeiten keinen großen Schwankungen unterliegen. Stehen mehr Messungen zur *Berechnung eines Standortes* zur Verfügung, so lässt sich diese mit statistischen Methoden meist genauer und zuverlässiger durchführen.

Viele dieser Umstände spiegeln sich auch bei *Angaben in der Literatur* wider (Tab. 6–4.). Abgesehen von fehlenden Genauigkeitsmaßen und Aussagen zur statistischen Wahrscheinlichkeit, werden meist nur ungefähre Bereiche genannt, innerhalb derer die Genauigkeit einer Standortangabe liegen soll. Diese Angaben sind entweder sehr ähnlich bzw. sogar völlig ident, da sie gegenseitig übernommen wurden und mangels Standards auf groben Schätzungen beruhen, oder sie unterscheiden sich wesentlich. Letzteres resultiert meist daraus, dass sie Spezialfälle wiedergeben, deren Situationen und Rahmenbedingungen im Detail publiziert wurden. Weiters gibt es noch grob abweichende Angaben, die journalistischen Charakters sind, da sie auf keinen fachlichen Recherchen beruhen und mitunter eine Thematik überzeichnen sollen (z.B. Datenschutz).

Es lässt sich somit die These bestätigend festhalten:

Zur Beschreibung und Beurteilung der Qualität, insbesondere der Genauigkeit, einer Standortbestimmung für Location Based Services, ist neben einem eindeutig definierten *Genauigkeitsmaß* in Verbindung mit einer *statistischen Wahrscheinlichkeit* zusätzlich das Wissen um alle eingegangenen *Transformationen* zwischen unterschiedlichen Koordinatensystemen notwendig.

Als wesentlich bedeutsamer hat sich jedoch herausgestellt die Anwendung eines *vereinbarten und anerkannten Reglements*, also der Einsatz bestimmter vorgegebener *Methodiken*, nach denen Testmessungen und Evaluierungen in den jeweiligen Mobilfunknetzen bzw. Teilen davon durchgeführt werden müssen. Diese bedürfen jedenfalls auch festgelegter *Antwortzeiten* für die Positionsergebnisse, bezogen auf das Mobilgerät selbst, einen Location Server oder eine Applikation eines externen Diensteanbieters (z.B. einer Notrufannahmestelle).

Gewisse *Genauigkeitsbereiche* für die Ortsbestimmung bei Location Based Services lassen sich a priori nicht von einer konkreten *Methode der Ortung* ableiten. Diesbezügliche *Klasseneinteilungen* sind folglich und weiters durch Kombination, Integration bzw. Hybridtechniken obsolet. Letztendlich zählt ausschließlich die Qualität eines erzielten Endergebnisses. Dies gilt insbesondere bei allen Notrufszenarien.

7.3. Zukünftige Ansätze

An einem einfachen **Gedankenexperiment** soll demonstriert werden, was obige Aussagen beinhalten (Kap. 7.2.) und wie sich aus der Sicht eines in starker Bedrängnis befindlichen „Notrufenden“ gewisse Szenarien bezüglich Ortungsmöglichkeiten darstellen. Hiermit können in einem zusammenwachsenden Europa bestehende E-112-Dienste vereinheitlicht, ausgebaut und hinsichtlich ihrer Qualität wesentlich verbessert werden⁶⁰.

Das Beispiel sei im Bereich des neuen **Wiener Hauptbahnhofes** gelegen, der nach fast 150 Jahren, begleitet von vielen unterschiedlichen Ideen, Konzepten und Projektvorschlägen, nun endgültig zwischen Südtirolerplatz und dem ehemaligen Südbahnhofareal errichtet worden ist. Abb. 7–1. zeigt einen der ersten grandiosen Entwürfe zu einem Zentralbahnhof in Wien aus dem Jahre 1873, jedoch gelegen auf Teilen des heutigen Karlsplatzes⁶¹.

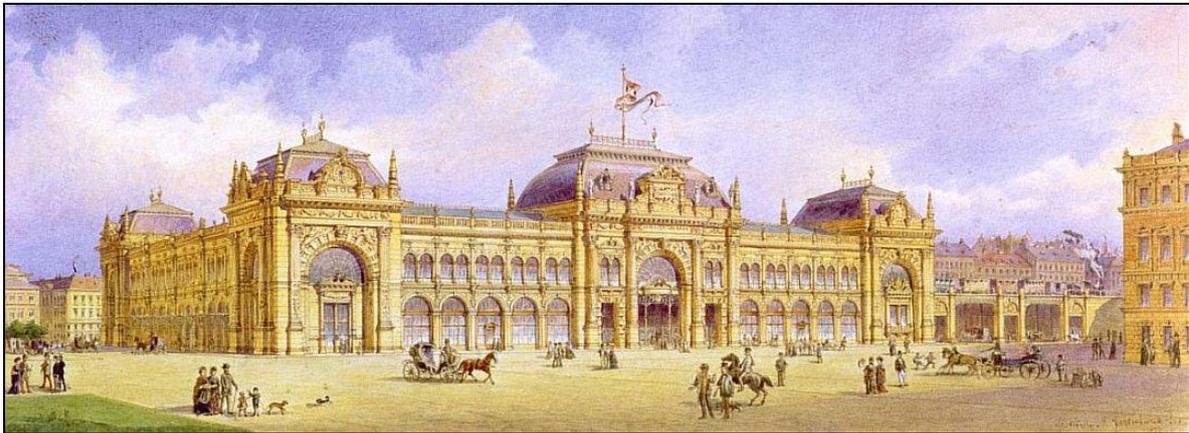


Abb. 7–1.: Entwurf eines „Wiener Centralbahnhofes“ (Großer-Bahnhof, 2006)

Die alte Wiener Tradition fortsetzend, Bahnhöfe lange ohne direkte U-Bahn-Anbindung zu belassen (in diesem Fall sogar neu zu bauen), ist vorgesehen, den Wiener Hauptbahnhof öffentlich über die **U1-Station Südtiroler Platz Hauptbahnhof** und einen mehrere hundert Meter weiten Fußmarsch zu erreichen (abgesehen von Bussen, Straßenbahnlinien und der S-Bahn). Spätere Konzepte, wie z.B. eine **U2-Verlängerung nach Süden** mit unterschiedlichen Varianten und einer **Cable-Liner-Verbindung** zu dieser Trasse (bisweilen auch mit *People-Mover* oder *Mini-Metro* bezeichnet (DiePresse, 2009; Wikipedia, 2014w)), wurden diskutiert, aber nicht beschlossen. Somit steht seit der offiziellen Hauptinbetriebnahme des Bahnhofes im Oktober 2014 einerseits die lange Passage zwischen den unterirdischen Teilen des Südtirolerplatzes und des Vorplatzes Nord zur Verfügung (*rot eingetragener*

⁶⁰ Folgende Angaben in Bezug auf Mobilfunknetze beruhen auf Auskünften des Mobilfunkanbieters „A1“ und auf Annahmen, wo Details nicht zu erlangen waren. Angegebene Genauigkeiten verstehen sich als *IdRMS* (mit ca. 67% Wahrscheinlichkeit). Die städtebauliche Situation sowie die Bedingungen der öffentlichen Verkehrsmittel des beschriebenen Beispiels sind dem Autor als jahrzehntelangem „Wiener Fußgänger“ bestens bekannt.

⁶¹ Dieser Entwurf von *Friedrich König* und *Rudolf Feldscharek* im Stil der Neorenaissance hätte sich an der Stelle des ehemaligen Freihauses befunden, heute eingenommen von der äußeren Operngasse, dem Institutsgebäude „Freihaus“ und der Bibliothek der Technischen Universität.

Weg in Abb. 7–2.). Andererseits kann bzw. muss (z.B. bei einer Sperre der Passage) die oberirdische Variante über den weitläufigen Kreuzungsbereich genommen werden (*blauer Weg*).

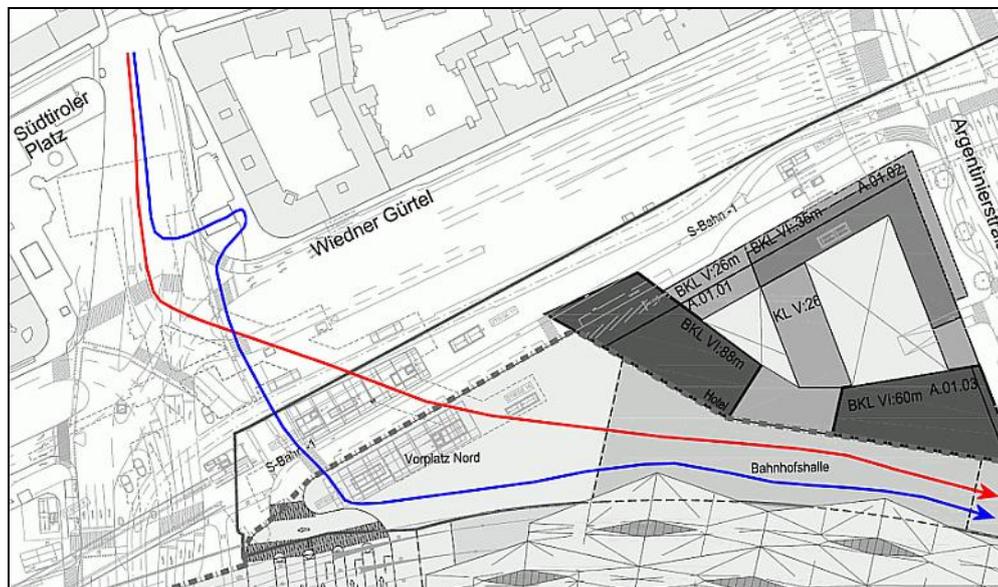


Abb. 7–2.: U-Bahn-Anbindung des neuen Wiener Hauptbahnhofes
(Hauptbahnhof-Wien, 2009) bearbeitet

Es sei nun angenommen, ein **älterer Tourist**, nur seiner Muttersprache mächtig, erleidet an einem heißen Sommertag auf diesem *blauen Weg* zum Bahnhof einen schweren Kreislaufkollaps. Im Wissen um seine Herz- und Kreislaufprobleme ist er ausgerüstet mit einem A-GNSS-fähigen Mobilfunkgerät (Kap. 3.3.6.), versehen mit einer speziellen Notruftaste, die direkt mit dem **Dienst E-112** verbindet (Kap. 3.1.3.). Aus Schwäche- und Sprachgründen, darüber hinaus ortsunkundig, kann der Tourist weder seine Lage noch Befindlichkeit mitteilen. Die Notrufstelle muss somit einen Einsatz starten, der ausschließlich auf den per E-112 übermittelten Standortdaten beruht (vorausgesetzt natürlich, dass solche Möglichkeiten der Koordinatenübertragung bereits geschaffen worden sind).

Wird der **Notruf** noch im **unterirdischen Bereich** der U1-Station Südtiroler Platz Hauptbahnhof getätigt, so steht das Mobilgerät mit einer Zelle in Verbindung, die sehr lang gestreckt und sicherlich noch mit diversen Repeatern erweitert ist⁶². Ein Satellitenempfang ist unterirdisch nicht möglich, mehrere benachbarte Zellen für Signalstärkemessungen sind nicht vorhanden und andere Methoden im Netz nicht implementiert. Somit kann als Standort bestenfalls der Mittelpunkt einer sehr langgestreckten und verwinkelten Zelle herangezogen werden, mit einer Güte von *mehreren hundert Metern*. Die Suche nach dem Notrufenden gestaltet sich somit, insbesondere zu Zeiten starker touristischer Frequenz mit großen Personenansammlungen und damit schlechten Sichtbedingungen, sehr schwierig bis unmöglich.

Im **oberirdischen Kreuzungsbereich** des Südtirolerplatzes mit dem Wiedner Gürtel wird ein Notruf sehr genaue Standortdaten mit A-GNSS von etwa 3-5 m erzielen, wenn ein entsprechender Location Server auch differentielle Korrekturen einsetzt. Sollte eine Serververbindung nicht möglich sein,

⁶² Die Mobilfunkversorgung in den U-Bahn-Tunnels selbst erfolgt über eine schlauchförmige Struktur mit Antennen in Leitungsform.

kann auf eine *autonome GNSS-Lösung* gewartet werden, vorausgesetzt die Antwortzeit wird von der Notrufstelle akzeptiert und die Applikation am Mobilgerät kann diese Berechnungen durchführen. Die Genauigkeit der Lokalisierung wird hierbei *10-15 m* betragen.

Gleichzeitig können, sofern vom Netzbetreiber vorgesehen und ausgewertet, *erweiterte Signalstärkemessungen* zu umliegenden Sendern vorgenommen werden, die bei GSM in dieser offenen Kreuzungssituation gute Ergebnisse von ca. *100 m* hervorbringen sollten. Letztendlich ließe sich immer noch auf die Methode *Cell-ID* zurückgreifen, wobei in diesem städtischen Gebiet, je nach Netzart und -form, geschätzte Zellgrößen von *300-1000 m* zu erwarten sind.

Am komplexesten stellt sich die Situation am **Hauptbahnhof** selbst dar. Je nachdem ob der Notruf aus einer unterirdischen Zone, einem Stahlbeton-, Ziegel- oder Glasgebäude, oder von den Bahnsteigen, die in diesem Falle auf Hochtrassen liegen, abgegeben wird, ist eine Ortsbestimmung mit *A-GNSS* möglich oder nicht. Genauigkeitsmäßig lassen sich hier nur sehr vage Angaben machen, da dies stark von den lokalen Bedingungen abhängt. Wünschenswert wäre in einer derart heterogenen Umgebung eine Integration mehrerer Methoden wie *A-GNSS*, Laufzeitmessungen mittels Mobilfunksignalen (z.B. *UL-TDOA*) und Signalstärkemessungen. Somit ist die Wahrscheinlichkeit eines Ergebnisses besser als durch Ortung per *Cell-ID* zumindest oberirdisch deutlich erhöht.

Zellgrößen und *-formen* sind im Bereich eines Zentralbahnhofes dieses Ausmaßes sehr unterschiedlich ausgeprägt und auch abhängig von der Art des Mobilfunknetzes (GSM, UMTS oder LTE(-A)). Der Wiener Hauptbahnhof wird wegen des großen Bedarfes an Kapazitäten mit mehreren sich überdeckenden Zellen bzw. Sektoren je Netzanbieter ausgestattet sein. Für Videotelefonie und Internetverbindungen stehen zusätzlich Picozellen zur Verfügung. Als Kunde hat man jedoch keinen direkten Einfluss darauf, welcher Zelle man zugeteilt und somit auch nicht, wie genau eine Ortsbestimmung via *Cell-ID* möglich ist. Für diese können Werte zwischen *500 m* und *1 km* bei Makrozellen, die auch als Schirmzellen fungieren können, auftreten oder nur *30-50 m* bei Picozellen, mit sehr hohen Datenraten an Stellen mit großer Personendichte, wie z.B. im Schalterbereich, in Wartezonen oder in Lokalen.

Das Gedankenexperiment lässt sich letztendlich vereinfachend wie folgt zusammenfassen. Es könnte gelingen im „*Durchschnitt aller Situationen*“ und bei entsprechend guter Standortwahl eine Lokalisierungsgenauigkeit zu erreichen, wie sie z.B. die FCC für den mobilen Notruf E-911 in den USA vorgibt (Kap. 3.1.2.). Ein Notrufender kann sich hierzulande unter heutigen Bedingungen jedoch keinesfalls darauf verlassen. Er muss jedenfalls mit Werten zwischen ca. *3 m* und *1 km* rechnen. Dies birgt in einer zeitlich sehr kritischen Situation ein hohes Risiko, ihn nur auf Grund solcherart ermittelten Standortdaten (rechtzeitig) aufzufinden.

Eine **Verbesserung** dieses unsicheren und inkonsistenten Zustandes kann durch mehrere Maßnahmen erfolgen, die vordergründig methodologische und legistische Ansätze verfolgen:

- Das freie Spiel der Marktwirtschaft bei der Einführung von Ortsbestimmungsmethoden für Notrufdienste wie E-112 und eCall wird durch *schrittweise verpflichtende Vorgaben* ersetzt. In der EU müsste dies durch Verordnungen der Kommission erfolgen, beruhend auf einem breiten Konsens der Mitgliedsländer, was nicht einfach umzusetzen, jedoch notwendig ist.

- Einführung von *Ortsbestimmungsmethoden*, die speziell *innerhalb von Bauwerken* ober und unter Tags eingesetzt werden können (z.B. Bluetooth in der Verwendung als einfache Cell-ID, da dieser standardisierte Nahbereichsfunk heute beinahe schon auf jedem Mobilgerät verfügbar ist und je nach Version, Leistungsklasse und Sichtverbindung Reichweiten von ca. 5-500 m erzielen kann⁶³).
- Eine zunehmende *Trennung unterschiedlicher Standortsituationen* bei der Beurteilung einer Ortungsgenauigkeit, wie z.B.: ober- und unterirdisch, innerhalb und außerhalb von Gebäuden, im Straßennetz verschiedener Hierarchie oder als Fußgänger in öffentlichen Verkehrsmitteln, in speziellen Ballungsszenarien wie auf Bahnhöfen und Flugplätzen, in Häfen oder in Tief- und Hochgaragen etc..
- Eindeutige *Definition und Verfeinerung der Klassifizierung von Umgebungsmodellen* (z.B. „Urban A - E“, „Suburban A - C“, Indoor Urban I - V etc.).
- Normierte *Vorgaben zur Standortwahl für Testmessungen* innerhalb von Umgebungsmodellen sowie Festlegung ihrer Anzahl und Dauer (kann rasterartig im Versorgungsbereich eines Mobilfunkanbieters erfolgen, wie z.B. bei der Bundeswaldinventur⁶⁴, nach einer Zufallsverteilung, hierarchisch oder kombiniert etc.).
- Festhalten einer *eindeutigen Vorgangsweise*, wie die Ergebnisse von Testmessungen zu kombinieren sind bei der Berechnung der „offiziellen“ Genauigkeiten in verschiedenen Regionen bzw. Gebieten (z.B. dem gesamten Versorgungsgebiet des jeweiligen Mobilfunknetzes, eines Bezirkes, einer Gemeinde, einer Notrufannahmestelle, eines Zählsprengels etc.).

7.4. All-In Universalsensoren – ein Lösungsweg?

Als letzter Teil dieser Arbeit soll ein *Vorschlag* gemacht werden, womit sich die Problematik der Ortsbestimmung bei Notrufen unter gewissen Voraussetzungen lösen lässt. Dazu zählt jedenfalls, dass hier jegliche datenschutzrechtliche Belange (vorerst) außer Acht gelassen werden und weiters von der Absicht eines Hilfesuchenden ausgegangen wird, sich durch Absetzung eines Notrufes über ein geeignetes Gerät lokalisieren zu lassen. Der Ansatz setzt sich bewusst nicht mit technischen Details auseinander, da diese im Zuge der raschen Entwicklung ständig voranschreiten, sondern beschreibt eine Methodologie aus dem alleinigen Blickwinkel des Notrufenden im Kontext der Datenqualität.

⁶³ Mobilfunkgeräte unterschiedlichster Art sind heute meist mit Bluetooth ab der Version 2.x ausgestattet. Betrieben in der Leistungsklasse 2 (2,5 mW) ist damit eine Reichweite von ca. 10-50 m zu erzielen (Sauter, 2008; 2013; Wikipedia, 2015a). Eigens durchgeführte Testmessungen mittels zweier Nokia-Modelle (6300 und 5310) im freien Feld und mit direkter Sichtverbindung ergaben jedenfalls gesicherte Übertragungen bis 60 m. Auch das Durchdringen von Wänden (sogar Stahlbeton) ist im Kurzbereich (<10 m) möglich.

⁶⁴ Die bundesweite Waldinventur in Deutschland wird mittels eines genordeten Gitterrasters von 4 x 4 km durchgeführt. Als Stichprobengebiete dienen sogenannte *Trakte* mit einer Ausdehnung von 150 m im Quadrat und zentrisch gelegen in den Schnittpunkten des Rasters (Hamberger, 2002). Zum Auffinden der gesuchten Punkte wird GPS auf C/A-Code-Basis eingesetzt. In Österreich gibt es ein sehr ähnliches Waldinventur-Verfahren, das bereits seit 1961 ein systematisches Stichprobennetz einsetzt, mit geringen Unterschieden bei der Größe des Rasters und der Trakte sowie einer leichten Verdrehung zum Gitternetz (Schieler und Hauk, 2001; Wikipedia, 2014v). Die EU ist jedoch darum bemüht, diese Inventuren in allen Mitgliedsländern zu vereinheitlichen.

Was ist hierbei „All-In“?

Die **Sensoren** sind Bestandteil eines Netzwerkes, das den Notrufenden detektieren soll (im Sinne von seine Position ausmachen) und, im einfachsten Falle, den Notruf samt Positionsdaten an die nächstgelegene zuständige Notrufleitstelle übermittelt. Hierzu haben die Sensoren *alles* was sie dafür benötigen an Board und bedürfen, nach erfolgter Inbetriebnahme, auf einige Jahre hinweg keiner Bedienung bzw. Manipulation von außen.

- Die *Energieversorgung* kann, sofern sie nicht kabelgebunden ist, mit Akku- und Brennstoffzellen sowie Photovoltaik und anderen Technologien des „Energie Harvestings“ erfolgen (*Wikipedia, 2015c*).
- Die *Vernetzung* und *Kommunikation* zwischen den Sensoren erfolgt per Funk. Daten können selbständig oder auf Anweisung von Sensor zu Sensor weitergegeben und auch entsprechend verarbeitet werden. Dazu verfügen die Sensoren über ein Mindestmaß an Eigenintelligenz und Datenspeicher. Bei Ausfall einzelner Sensoren ist durch Redundanzen der Übertragungswege sichergestellt, dass Notrufe trotzdem in die Leitstelle gelangen.
- Sensoren kennen ihre eigene *Position* durch einmalige Ermittlung oder Mitteilung bei Inbetriebnahme und können, wenn mit höherwertiger Technologie ausgestattet, diese im Netz auch selbst bestimmen bzw. evaluieren.
- Die *Ortungsfunktionalismen* im Sensornetz erfolgen per Funk, im einfachsten Fall mit der Methode „Proximity“. D.h. die Lage des Hilfesuchenden wird durch die Position derjenigen in der Nähe befindlichen Sensoren repräsentiert, zu denen er mit seinem Notrufgerät Verbindung herstellen kann. Mit erweitertem Technologieaufwand und damit auch steigender Genauigkeitserwartung lassen sich z.B. auch Signalstärkemessungen vornehmen. Daraus ist es möglich, Distanz- und gegebenenfalls auch Richtungsbestimmungen durchzuführen und somit weiters mittels Tri-/Multilateration bzw. –angulation oder kombinierten Ansätzen den Standort abzuleiten. Dies kann, ein entsprechender Aufwand vorausgesetzt, heute schon mit Ergebnissen von $< 3\text{ m}$ erfolgen, wie u.v. in (*Feldmann et al., 2003; Hallberg et al., 2003; Kotanen et al., 2003; Castano et al., 2004; Forno et al., 2005; King et al., 2009; Akeila et al., 2010*) gezeigt wird.

Was ist ein Universalsensor?

Ein Notrufender möchte überall dort geortet werden können und somit auch auffindbar sein, wo er sich gerade befindet. Niemand kann sich einen Notrufort oder eine –zeit aussuchen. So gesehen ist es notwendig, dass ein Paradigmenwechsel beim Ortungssystem eintritt, nicht beim Notrufenden. Ein solches System muss den Notrufenden finden, indem es „zu ihm kommt“, im Gegensatz zu Methoden, bei denen der Notrufende zum System kommen muss, damit es ihn findet.

Daraus lässt sich folgern, dass zumindest ein solcher „*Universalsensor*“ überall dort vorhanden sein können muss, wo auch ein potentieller Notrufender hingelangen bzw. sich aufhalten kann. Dies betrifft alle Orte ober und unter tags sowie innerhalb und außerhalb jeglicher Bauwerke an denen Menschen sich befinden können.

Wieso ein Lösungsweg?

Bei diesem Ansatz besteht nur eine einzige Voraussetzung beim Notrufenden selbst und die ist ein Sensor derselben Art, der mit dem Ortungssensornetzwerk auf geeignete Art und Weise in Verbindung treten kann. Ein solcher „*persönlicher Notrufsensor*“ kann ausschließlich für Notrufzwecke ausgelegt sein (wie z.B. an einem Armband oder Anhänger) oder in Verbindung mit anderen Sensoren oder Kommunikationsgeräten sein bzw. stehen (z.B. Gasdetektoren, Pager, Mobil- und Blaulichtfunk).

Bei Kontaktaufnahme weiß das Sensornetzwerk, wo dies stattfindet, da jeder Sensor seinen Ort kennt. Diese Ortsinformationen werden, im einfachsten Fall, über das Sensornetzwerk selbst zur nächstgelegenen zuständigen Notrufleitstelle übertragen und dort entsprechend weiter behandelt. Dies bedingt ein Minimum an Routingintelligenz im Netzwerk und kann ergänzt werden z.B. mit Übertrittsknoten in Mobilfunknetze an Stellen, wo dies möglich und sinnvoll ist.

Ein Notruf bedarf somit nicht notwendigerweise eine unmittelbare Sprachverbindung mit einer Leitstelle, um den „Status“ Notfall mitsamt entsprechenden Ortsinformationen verbal zu übermitteln. Umgekehrt kann eine Einsatzzentrale direkt mittels des Sensornetzwerks eine Bestätigungsmeldung über den Erhalt des Notrufes zurück an den Hilfesuchenden schicken.

Mögliche Ausprägungen der Sensoren:

- **Am Beispiel von Bluetooth-Funk⁶⁵:**
 - Bluetooth (BT) funktioniert mit allen Versionen ober und unter tags sowie innerhalb und außerhalb von Bauwerken jeglicher Art.
 - BT wurde von Anfang an so entwickelt, dass es Materie (selbst Stahlbeton) durchdringen kann und daher keine direkte Sichtverbindung zur Kontaktaufnahme benötigt.
 - BT-Standards kennen unterschiedliche Leistungsklassen mit entsprechend differenziertem Energieverbrauch. Damit in direktem Zusammenhang stehen Art und Geschwindigkeit eines Verbindungsauf- und -abbaus, verschiedene Standby- und Schlafmodi sowie die Funkreichweiten zwischen Sensoren (Distanzen von einem Kilometer bei freier Sicht sind hierbei heute kein Problem mehr (*Wikipedia, 2015a*)).
 - Für unterschiedlichste Verwendungszwecke kennen BT-Standards bereits verschiedene Netztopologien.
 - Einfache Ortungsfunktionalismen (in einer Art von „Proximity“) sind mittlerweile durch Profile in den BT-Standards festgelegt.

- **Unter Verwendung von symbolischen Koordinaten:**
 - Jeder Sensor im Netzwerk verfügt jedenfalls über *symbolische Koordinaten*⁶⁶. Diese stellen eine Beschreibung des Ortes, ähnlich einer Angabe, wie sie ein Notrufender mit guter

⁶⁵ Literatur zu Bluetooth ist mittlerweile sehr umfangreich und gut dokumentiert vorhanden. Darum sei hier nur exemplarisch auf die Web-Seite selbst (*Bluetooth-SIG, 2015*), einen Wiki-Eintrag (*Wikipedia, 2015a*) und ein wohlbekanntes Lehrbuch verwiesen (*Sauter, 2008; 2013*).

⁶⁶ Symbolische Koordinaten sind z.B. ein Bestandteil von Geocast als Routing-Schemata unter dem bekannten Standard IPv6 (*Wikipedia, 2015d*).

Kenntnis seiner Lage auf die Frage: „Wo befinden sie sich gerade?“ machen würde. D.h. hier werden systematisierte Adressangaben verwendet, erweitert um in diesem Kontext nützlichen Zusätzen, die die Auffindbarkeit durch Rettungskräfte erhöhen.

Dazu zählen z.B. Beschreibungen von Gebäudeteilen, Stockwerksangaben, Raumnummern und -bezeichnungen, Himmelsrichtungen etc. in Bauwerken sowie Wegenetzangaben, Katastralgemeinde- und Grundstücksnummern, Benützungarten und Nutzungen in Ortschaften bzw. im freien Gelände. Viele dieser Informationen stehen in Österreich in wohlbekannten Registern bereits bundesweit einheitlich zur Verfügung: Gebäude-, Wohnungs- und Adressregister sowie die Grundstücksdatenbank.

- Ergänzend zu den symbolischen stehen die üblichen *geographischen Koordinaten* zur Verfügung (*Kap. 4.1.3.*) an Orten, wo diese mit entsprechenden Methoden (vorzugsweise mit Assisted-GNSS, *Kap. 3.3.6.*) ermittelt werden können oder aus Planungen bereits bekannt sind. Geographische Koordinaten sind nur an jenen Stellen notwendig, an denen symbolische nur eine geringe oder gar keine Auffindbarkeit gewährleisten wie z.B. freies Gelände ohne Wegenetze, Wälder, Gebirge, große Wasserflächen usw..

- **An sinnvollen Standorten:**

- *Bauwerke*: Ein-, Ausgänge, -fahrten, Stiegenhäuser, Aufzüge, Rauch-, Brandmelder⁶⁷, ...
- *Siedlungsgebiet*: Ampelanlagen, Haltestellen, Verkehrszeichen, Straßenbeleuchtung, ...
- *Wegenetze*: unterschiedliche Verkehrsleiteinrichtungen, Leitpfosten, -pflöcke⁶⁸, Masten, Signalanlagen, Km-Marken ...
- *Gelände*: Beschilderungen, Markierungen, Grenzsteine, gezielte Auspflockung ...

Die Sichtweise der Datenqualität:

Aus dem Blickwinkel eines *Notrufenden* sollte das Ortungssystem folgende Bedingungen erfüllen, um mit den entsprechenden Positionsdaten seine Auffindbarkeit zu gewährleisten:

- Sein Notrufgerät muss das Sensornetzwerk (SNW) mit den Ortsinformationen erreichen. D.h. es müssen bei jedem Notruf Daten mit seinem Ortsbezug vorhanden sein → *Vollständigkeit*.
- Das SNW muss am Notrufort funktionieren (Stromversorgung, Redundanz bei Ausfall einzelner Sensoren) → *Verfügbarkeit*.
- Das SNW muss ausreichend „dicht“ sein, damit der Notrufende auffindbar ist → *Genauigkeit*.
- Das SNW muss überall „gleich dicht“ und redundant aufgebaut sein, sodaß Notrufende vor Ort „gleich schnell“ aufgefunden werden können → *Konsistenz*.
- Das SNW muss den Notruf inklusive Ortsinformationen in eine Zentrale melden können. Die Struktur und Formate dieser Informationen bedingen wohl definierte Schnittstellen und Protokolle → *Zugänglichkeit*.

⁶⁷ In immer mehr Ländern sind zumindest Rauchmelder in verschiedenen Bauvorschriften bereits verpflichtend. Nachdem dies eine Zeit lang nur für Neubauten galt, geben die jeweiligen Gesetzgeber schrittweise auch Nachrüstpflichten vor, die alle Bauwerke, inklusive Wohnungen, betreffen (*Brandrauchprävention-e.V., 2015; Wikipedia, 2015b*).

⁶⁸ Leitpflocke entlang den Straßenrändern haben einen vorgegebenen Abstand, in Österreich 33 m, in Deutschland 50 m (*Wikipedia, 2015e*).

- Die einzelnen Sensoren des SNW müssen in periodischen Abständen ihre Position evaluieren bzw. kontrollieren können, um diesbezügliche Veränderungen zu erkennen → *Aktualität*.

Es lässt sich erkennen, dass aus Sichtweise der Datenqualität ein Netzwerk aus „All-In Universalsensoren“, wie es in diesem Vorschlag beschrieben ist, die Bedürfnisse eines Notrufenden hinsichtlich seiner Auffindbarkeit erfüllen kann. Landesweit eingesetzt und akzeptiert ließe sich damit die Problematik der Ortsbestimmung bei Notrufen lösen.

Wissen sollte man durch Weisheit ersetzen,
dadurch wird Sorge schwinden.
Alles nur mit dem Verstand zu erfassen wollen,
wird Weisheit vertreiben.

Laotse

Literaturverzeichnis

- 3GPP** (2014a): *LTE*. Web-Page. www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte, Capt.: 2014. 3GPP, Sophia Antipolis, France.
- 3GPP** (2014b): *LTE-Advanced*. Web-Page. www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced, Capt.: 2014. 3GPP, Sophia Antipolis, France.
- Akeila, Ehad; Salcic, Zoran; Swain, Akshya et al.** (2010): *Bluetooth-based Indoor Positioning with Fuzzy Based Dynamic Calibration*. Dep. of Electrical & Computer Engineering, Univ. of Auckland, New Zealand. Conf. Paper, pp 1415-1420, ISBN 978-1-4244-6890-4. TENCON 2010. IEEE Inc., Los Alamitos, CA, USA.
- Au, Maggie** (2008): *CDMA operators will choose LTE*. Web-Page, 20.06.2008. www.telecomasia.net/content/cdma-operators-will-choose-lte-says-zte-0, Capt.: 2009. Questex Asia Limited, Hong Kong.
- Axelrad, Penina** (2001): *Notes on Positioning Errors*, ASEN 5190. Manuscript, 08.09.2001, 2 pp. http://spot.colorado.edu/~axelrad/ASEN5190/error_notes.pdf, Capt.: 2001. Aerospace Engineering Sciences, Univ. of Colorado Boulder.
- Bahl, Paramvir; Padmanabhan, Venkata N. und Balachandran, Anand** (2000): *Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System*. Technical Report, MSR-TR-2000-12, Feb. 2000, 13 pp. <ftp://research.microsoft.com/pub/tr/tr-2000-12.pdf>, Capt.: 2000. Microsoft Research & Univ. of California, Redmond & San Diego, USA.
- Balbach, Oliver** (2000): *UMTS - Competing Navigation System and Supplemental Communication System to GNSS*. Conf. Paper, ION GPS 2000, 19.-22. Sep., Salt Lake City, UT, pp 519 - 527. www.ifen.com/content/publications/IONGPS2000_UMTS.pdf, Capt.: 2000. IfEN Gesellschaft für Satellitennavigation mbH, Neubiberg, Germany.
- Balbach, Oliver** (2006): *Positionsbestimmung in Mobilfunksystemen*. Journal: Erfinderaktivitäten 2005/2006, S. 5-13. www.dpma.de/docs/service/veroeffentlichungen/erfinderaktivitaeten/ea2005.pdf, Zugr.: 2009. Deutsches Patent- und Markenamt, München.
- Barczok, Achim; Himmelein, Gerald und König, Peter** (2009): *Erweiterte Wirklichkeit*, Augmented Reality: Computer-unterstützter Blick in die Welt. Web-Fachartikel, Heise Mobil, 23.10.2009. <http://heise.de/-838027>, Zugr.: 2009. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Bauer, Manfred** (1997): *Vermessung und Ortung mit Satelliten*, NAVSTAR-GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme. Lehrbuch, 4. Aufl., 423 S., ISBN 3-87907-245-0. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Bauer, Manfred** (2003): *Vermessung und Ortung mit Satelliten*, GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme. Lehrbuch, 5. neu bearb. u. erw. Aufl., 392 S., ISBN 3-87907-360-0. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Bauer, Manfred** (2011): *Vermessung und Ortung mit Satelliten*, Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme. Lehrbuch, 6. neu bearb. u. erw. Aufl., 479 S., ISBN 978-3-87907-482-2. Herbert Wichmann Verlag, Berlin und Offenbach.
- Berg, Andrew** (2009): *Verizon Completes LTE Data Calls*. Web-Page, Wireless Week, 17.08.2009. www.wirelessweek.com/news/2009/08/verizon-completes-lte-data-calls, Capt.: 2014. Advantage Business Media, Madison, WI, USA.
- BEV** (2001a): *Austrian Geodynamic Reference Frame*. Web-Seite. www.bev.gv.at, Zugr.: 2001. Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Wien.
- BEV** (2001b): *Transformation zwischen dem System der Landesvermessung und globalen Bezugssystemen*. Web-Seite. www.bev.gv.at, Zugr.: 2001. Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Wien.

- BEV** (2006): *Koordinatensysteme*. Kundeninformation, Koord - Sys 2006 A, 2 S. [www.bev.gv.at, Koord-Sys.pdf](http://www.bev.gv.at/Koord-Sys.pdf), Zugr.: 2009. Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Wien.
- BEV** (2009): *Ab 2010: alle staatlichen Landkarten im UTM-Blattschnitt*. Web-Seite. www.bev.gv.at, Zugr.: 2009. Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Wien.
- Biacs, Zoltan; Marshall, Grant; Moeglein, Mark et al.** (2002): *The Qualcomm / SnapTrack Wireless-Assisted GPS Hybrid Positioning System and Results from Initial Commercial Deployments*. Conference Paper, ION GPS 2002, 24.-27. Sep., Portland, OR, 7 pp. www.snaptrack.com, Capt.: 2003. SnapTrack Inc., San Jose, CA, USA.
- Björn-Steiger-Stiftung** (2014): *Über die Stiftung*. Web-Seite. www.steiger-stiftung.de/ueber-die-stiftung, Zugr.: 2014. Björn Steiger Stiftung, Winnenden, Deutschland.
- Bluetooth-SIG** (2015): *Bluetooth Special Interest Group*. Web-Page. www.bluetooth.com, Capt.: 2015. Bluetooth SIG Inc., Kirkland, WA, USA.
- BMWT** (2009): *Verordnung über Notrufverbindungen (NotrufV)*, Drucksache 967/08. Verordnung, 28 S., Verabschiedung im Bundesrat 13.02.2009. Zugr.: 2009. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin.
- Borchers, Detlef** (2008): *Vor 25 Jahren: Das erste Mobiltelefon war ein "Knochen"*. Web-Seite, 13.06.2008. <http://heise.de/-754191>, Zugr.: 2009. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Brandrauchprävention-e.V.** (2015): *Rauchmelder - Gesetzgebung in Deutschland*. Web-Seite. www.rauchmelder-lebensretter.de/home/gesetzgebung/gesetzgebung-in-deutschland, Zugr.: 2015. eobiont GmbH, Berlin.
- Braun, Herbert** (2004): *Mehr EU-Gelder für Satelliten-Navigationssystem Galileo*. Web-Seite, 11.12.2004. <http://heise.de/-121017>, Zugr.: 2014. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Bretterbauer, Kurt und Weber, Robert** (2003): *A Primer of Geodesy for GIS Users*. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 64, 2. revised and ext. Edn., Oct. 2003, 55 pp. Univ. of Technology, Inst. of Geodesy and Geophysics, Dep. of Advanced Geodesy, Vienna.
- Briegleb, Volker** (2009): *Bundesregierung definiert Breitband neu*. Web-Seite, Heise Netze, 10.02.2009. <http://heise.de/-194016>, Zugr.: 2009. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Brimicombe, Allan und Li, Chao** (2009): *Location-Based Services and Geo-Information Engineering*, Mastering GIS: Technology, Applications and Management Series. Textbook, 1. Edn., 378 pp, ISBN 978-0-470-85736-6. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, GB.
- Brückmann, Dieter** (2008): *LTE - Nachfolgenergeneration von UMTS*. Web-Fachartikel, 24.04.2008. www.elektroniknet.de/kommunikation/sonstiges/artikel/857/0/, Zugr.: 2009. WEKA Fachmedien GmbH, Haar, Deutschland.
- Buck, Manfred** (2005): *eSafety - Aktivitäten in der EU*. DaimlerChrysler, CS/ET. Präsentation, 9. Fachkolloquium Straße und Verkehr, 10.-11. Nov. 2005, Stuttgart, S. 35-52. Inst. für Straßen- und Verkehrswesen, Univ. Stuttgart.
- Burroughs, Kirk; Sheynblat, Len; McGloin, Justin et al.** (2000): *Wireless Assisted GPS (WAG) for Wireless Internet Location Services*. Technical Report, T1P1.5/97-212, 03.01.2000, 4 pp. www.w3.org, Capt.: 2002. SnapTrack Inc., San Jose, CA, USA.
- Campell, James** (2000): *From Quasars to Benchmarks: VLBI Links Heaven and Earth*. Geodetic Inst. of the Univ. of Bonn. Proceedings, Vandenberg, Nancy & Baver, Karen (Eds.), pp 19-34. <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2000/campbell1/>, Capt.: 2008. IVS 2000 General Meeting, 21.-24. Feb. 2000, Kötzing, Germany.
- Castano, Javier Garcia; Svensson, Michael und Ekström, Mikael** (2004): *Local Positioning for Wireless Sensors Based on Bluetooth*. Mälardalen University, Sweden. Conf. Paper, pp 195-198, ISBN 0-7803-8451-2. IEEE Inc., Los Alamitos, CA, USA.
- CGALIES** (2002): *Report on implementation issues related to access to location information by emergency services (E-112) in the European Union*. Final Report, 28.01.2002, 99 pp. www.telematica.de/cgalies, CGALIES_Final-Report-v1_0_2002-02.pdf, Capt.: 2009. Coordination Group on Access to Location Information for Emergency Services (CGALIES).

- Coleman, Dave** (1998): *SnapTrack Enhanced GPS Positioning Method Evaluation Worksheet*. Technical Report, T1P1.5/98-152R1, 28.05.1998, 8 pp. www.tl.org, Capt.: 2001. SnapTrack Inc., San Jose, CA, USA.
- CPS** (2002): *Cambridge Positioning Systems (CPS)*. Web-Page. www.cursor-system.com, Capt.: 2002.
- DAFU** (2009): *LBS - Location Based Services*. Web-Seite, Datenfunk (DAFU). www.dafu.de/praxis/lbs.html, Zugr.: 2009. Bernd Mielke, Essen, Deutschland.
- DiePresse** (2009): *Hauptbahnhof: U2-Anbindung für ÖBB nicht notwendig*. Web-Seite, 16.07.2009. <http://diepresse.com/home/panorama/wien/495451/print.do>, Zugr.: 2010. Die Presse Verlags-Gesellschaft m.b.H. & Co. KG, Wien.
- Duden** (2010a): *Duden - Die deutsche Rechtschreibung*. CD-ROM, Digitales Nachschlagewerk, 25. Aufl., 2010. Bibliographisches Institut AG, Mannheim.
- Duden** (2010b): *Duden Korrektor*. CD-ROM, Die Duden-Rechtschreibprüfung für Microsoft Office und Works, Version 6.0, 2010. Bibliographisches Institut AG, Mannheim.
- Durlacher** (2000): *Mobile Commerce*. Report, 79 pp. www.durlacher.com, mcomreport.pdf, Capt.: 2001. Durlacher Research Ltd., London.
- Durlacher** (2001): *UMTS Report, An Investment Perspective*. 144 pp. www.durlacher.com, umts_report.qxd.pdf, Capt.: 2001. Durlacher Research Ltd., London, Eqvitec Partners OY, Helsinki & Univ. of Technology, Helsinki.
- Eberspächer, Jörg und Vögel, Hans-Jörg** (1997): *GSM, Global System for Mobile Communication, Vermittlung, Dienste und Protokolle in digitalen Mobilfunknetzen*, Buchreihe Informationstechnik. Lehrbuch, 1. Aufl., 342 S., ISBN 3-519-06192-9. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden.
- Eberspächer, Jörg; Vögel, Hans-Jörg und Bettstätter, Christian** (2001): *GSM, Global System for Mobile Communication, Vermittlung, Dienste und Protokolle in digitalen Mobilfunknetzen*, Buchreihe Informationstechnik. Lehrbuch, 3. aktual. u. erw. Aufl., 422 S., ISBN 3-519-26192-8. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden.
- EENA** (2009): *European Emergency Number Association*. Web-Page. www.eena.org, Capt.: 2009. EENA, Brussels, Belgium.
- Eissfeller, Bernd; Teuber, Andreas und Zucker, Peter** (2005): *Indoor-GPS: Ist der Satellitenempfang in Gebäuden möglich?* Inst. für Erdmessung und Navigation, Univ. der Bundeswehr München. zfv-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2005, S. 226-234. Wißner Verlag, Augsburg.
- El-Nahas, Hassan** (1998): *GDOP maps for mobile location*. Technical Report, T1P1.5/98-025, Jan. 1998, 4 pp. www.tl.org, Capt.: 2001. Nortel Matra Cellular, Guyancourt, France.
- eSafety-Forum** (2004): *Memorandum of Understanding for Realisation of Interoperable In-Vehicle eCall*. Memorandum, 28.05.2004, 7 pp. http://ec.europa.eu/information_society/activities/esafety/doc/esafety_library/mou/invehicle_ecall_mou.pdf, Capt.: 2009. eSafety Forum, eCall Driving Group, Brussels, Belgium.
- Europäische-Komm** (2003): *Empfehlung der Kommission vom 25. Juli 2003 zur Übermittlung von Angaben zum Anruferstandort in elektronischen Kommunikationsnetzen an um Standortangaben erweiterte Notrufdienste*, 2003/558/EG. Amtsblatt, L 189, S. 49-52, 29.07.2003. <http://eur-lex.europa.eu/de/index.htm>, Zugr.: 2009. Brüssel.
- Europäische-Komm** (2009a): *eCall: Zeit zur Einführung*, Mitteilung der Kommission an das Europ. Parlament, den Rat, den Europ. Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, KOM (2009) 434. 12 S., 21.08.2009. http://ec.europa.eu/information_society/activities/esafety/doc/comm_20090821/com_2009_0434_1_de.pdf, Zugr.: 2009. Brüssel.
- Europäische-Komm** (2009b): *Vorschlag der EU - bordeigenes Notrufsystem (eCall)*. Bürgerinfo, 2 S., 21.08.2009. http://ec.europa.eu/information_society/activities/esafety/doc/comm_20090821/citizens_sum_de.pdf, Zugr.: 2009. Brüssel.

- Europäischer-Rat** (1991): *Entscheidung des Rates vom 29. Juli 1991 zur Einführung einer einheitlichen europäischen Notrufnummer*, 91/396/EWG. Amtsblatt, L 217, S. 31-32, 06.08.1991. <http://eur-lex.europa.eu/de/index.htm>, Zugr.: 2009. Brüssel.
- Europäischer-Rat** (2002a): *Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. März 2002 über den Universaldienst und Nutzerrechte bei elektronischen Kommunikationsnetzen und -diensten (Universaldienstrichtlinie)*, 2002/22/EG. Amtsblatt, L 108, S. 51-78, 24.04.2002. <http://eur-lex.europa.eu/de/index.htm>, Zugr.: 2009. Brüssel.
- Europäischer-Rat** (2002b): *Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. März 2002 über einen gemeinsamen Rechtsrahmen für elektronische Kommunikationsnetze und -dienste (Rahmenrichtlinie)*, 2002/21/EG. Amtsblatt, L 108, S. 33-51, 24.04.2002. <http://eur-lex.europa.eu/de/index.htm>, Zugr.: 2009. Brüssel.
- Europäischer-Rat** (2009a): *Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 zur Änderung der Richtlinie 2002/22/EG über den Universaldienst und Nutzerrechte bei elektronischen Kommunikationsnetzen und -diensten (u. weitere)*, 2009/136/EG. Amtsblatt, L 337, S. 11-32, 18.12.2009. <http://eur-lex.europa.eu/de/index.htm>, Zugr.: 2009. Brüssel.
- Europäischer-Rat** (2009b): *Verordnung (EG) Nr. 544/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2009 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 717/2007 über Roaming in öffentlichen Mobilfunknetzen in der Gemeinschaft (u. weitere)*. Amtsblatt, L 167, S. 12-23, 29.06.2009. <http://eur-lex.europa.eu/de/index.htm>, Zugr.: 2009. Brüssel.
- FCC** (1999): *Third Report and Order*. FCC 99-245, 06.10.1999, 40 pp. www.fcc.gov, Capt.: 2002. Federal Communications Commission (FCC), Washington, DC.
- FCC** (2001a): *Fact Sheet: E911 Phase II Decisions*. Oct. 2001, 5 pp. www.fcc.gov/e911, Capt.: 2002. Federal Communications Commission (FCC), Washington, DC.
- FCC** (2001b): *Fact Sheet: FCC Wireless 911 Requirements*. Jan. 2001, 4 pp. www.fcc.gov/e911, Capt.: 2002. Federal Communications Commission (FCC), Washington, DC.
- FCC** (2007a): *FCC clarifies Geographic Area over which Wireless Carriers must meet Enhanced 911 Location Accuracy Requirements*, FCC News. PS Docket No. 07-114, 11.09.2007, 2 pp. http://fjallfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-276577A1.doc, Capt.: 2009. Federal Communications Commission (FCC), Washington, DC.
- FCC** (2007b): *Report and Order*. FCC 07-166, 11.09.2007, 35 pp. http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-07-166A1.pdf, Capt.: 2009. Federal Communications Commission (FCC), Washington, DC.
- Feldmann, Silke; Kyamakya, Kyandoghere; Zapater, Ana et al.** (2003): *An indoor Bluetooth-based positioning system: concept, implementation and experimental evaluation*. Inst. of Communications Engineering, Hannover, Germany. Paper, 5 pp. Capt.: 2014.
- Forno, Fabio; Malnati, G. und Portelli, G.** (2005): *Design and implementation of a Bluetooth ad hoc network for indoor positioning*. Dip. Automatica e Informatica, Politecnico di Torino, Italy. Conf. Paper, IEE Proc.-Softw., Vol. 152, No, 5, Oct. 2005, pp 223-228.
- Frank, Andrew** (1997): *Geographic Information Business in the Next Century*. Dep. of Geoinformation, Techn. Univ. Vienna. Proceedings, Hodgson, S., Rumor, M. & Harts, J. J. (Eds.), Vol. 1, pp 13-22. Third Joint European Conf. on Geographical Information (JEC-GI '97), 16.-18. Apr. 1997, Vienna. IOS Press, Amsterdam.
- Fritsch, Lothar und Muntermann, Jan** (2005): *Aktuelle Hinderungsgründe für den kommerziellen Erfolg von Location Based Service-Angeboten*. Lehrstuhl für M-Commerce und Mehrseitige Sicherheit, Johann Wolfgang Goethe-Univ. Frankfurt. Publikation, 14 S. www.is-frankfurt.de/publikationenNeu/AktuelleHinderungsgruendefuerden1160.pdf, Zugr.: 2014. Mobile Commerce Technologien und Anwendungen (MCTA 2005), Augsburg.
- FRP** (1999): *U.S. Federal Radionavigation Plan 1999*. Dec. 1999, 202 pp. www.navcen.uscg.gov, FRP_1999.pdf, Capt.: 2001. U.S. Dep. of Transportation & Dep. of Defense, Washington, DC.
- GAO** (2009): *Global Positioning System: Significant Challenges in Sustaining and Upgrading Widely Used Capabilities*. Report, 07.05.2009. www.gao.gov/products/GAO-09-0670T, Capt.: 2009. U.S. Government Accountability Office (GAO), Washington, DC.

- Garmin** (2002): *Garmin GPS III*. Web-Page. www.garmin.com/products/gpsIII, Capt.: 2002. Garmin Europe Ltd., Southampton, GB.
- Gartner, Georg; Frank, Andrew und Retscher, Günther** (2004): *Pedestrian Navigation System in Mixed Indoor / Outdoor Environment – The NAVIO Project*. CORP 2004 & Geomultimedia04, Feb. 2004, Vienna. Proceedings, Schrenk, Manfred (Ed.), pp 165-171, ISBN 3-901673-11-2. Selbstverlag des Inst. für EDV-gestützte Methoden in Architektur & Raumplanung, Techn. Univ. Wien.
- Garzik, Ludovit** (2002): *Nutzerakzeptanz von Location Based Services*. in: Geoinformation mobil (14. AGIT-Symposium, Jul. 2002, Salzburg), S. 45-54. Zipf, Alexander und Strobl, Josef (Hrsg.), ISBN 3-87907-373-2. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg und Salzburg.
- Geary, Wendy** (1999): *Location Determination Technologies for Cellular Enhanced 9-1-1 Service*, "No Matter Where You Go, There You Are" - But How Do We Find You? Master Thesis, 85 pp. Dep. of Geography, Eberley College of Arts and Sciences, Univ. of West Virginia, Morgantown.
- Goldman, Jeff** (2003): *The mobile emergency - E-911 and E-112*. Online Magazin, receiver Nr. 07, Mar. 2003. www.receiver.vodafone.com, Capt.: 2009. Vodafone Group Plc., Newbury, GB.
- Großer-Bahnhof** (2006): *Großer Bahnhof*, Wien und die weite Welt. Kos, Wolfgang und Dinobl, Günter (Hrsg.). Katalog zur gleichnamigen Ausstellung, 448 S., ISBN 3-7076-0212-5. Czernin Verlags GmbH und Wien Museum.
- Gruber, Gregor** (2014): *AI startet LTE mit 300 Mbit/s in Graz*. Web-Seite, 25.11.2014. <http://futurezone.at/produkte/ai-startet-lte-mit-300-mbit-s-in-graz/99.050.054>, Zugr.: 2014. Futurezone GmbH, Wien.
- Gu, Yanying; Lo, Anthony und Niemegeers, Ignas** (2009): *A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks*. Fac. of Electr. Computer Eng., Mathem. & Computer Science, Delft Univ. of Technology. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 11, No. 1, 04.03.2009, pp 13-32, ISSN 1553-877X. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA.
- Gunnarsson, Gudni; Alanen, M.; Rantalainen, T. et al.** (1998): *Location Trial System for Mobile Phones*. Nokia Mobile Phones, Nokia Research Center, Finland. Conf. Paper, The Bridge to Global Integration, Vol. 4, pp 2211-2216, ISBN 0-7803-4984-9. IEEE Xplore Digital Library, Capt.: 2001. IEEE Global Telecomm. Conf. (GLOBECOM 1998), 08.-12. Nov. 1998, Sydney. IEEE Inc., Los Alamitos, CA, USA.
- Gutmann, Frank** (2007): *Positionsbestimmung in GSM- und UMTS-Netzwerken*, Themenkreis: Location Based Services. Präsentation / Seminar, 10.07.2007, 31 S. www.ks.uni-freiburg.de, Zugr.: 2009. Albert-Ludwigs-Univ. Freiburg, Deutschland.
- Hallberg, Josef; Nilsson, Marcus und Synnes, Kare** (2003): *Positioning with Bluetooth*. Lulea Univ. of Technology, Dep. of Comp. Science & Electr. Engineering, Sweden. Conf. Paper, pp 954-958, ISBN 0-7803-7661-7. 10th Int. Conf. on Telecommunications (ICT 2003). IEEE Inc., Los Alamitos, CA, USA.
- Hamberger, Joachim** (2002): *Entwicklung und Einsatz eines Navigationsprogramms zum Auffinden forstlicher Inventurpunkte (Bundeswaldinventur II) zur Arbeitserleichterung und präzisen Vermessung*. in: Geoinformation mobil (14. AGIT-Symposium, Jul. 2002, Salzburg), S. 65-74. Zipf, Alexander und Strobl, Josef (Hrsg.), ISBN 3-87907-373-2. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg und Salzburg.
- Haselgrübler, Bernhard** (2000): *Ortsbestimmungsmethoden mittels GSM*. Präsentation / Privatissimum GeoPo 2000, Jun. 2000, 13 S. Inst. für Geoinformation, Techn. Univ. Wien.
- Haselgrübler, Bernhard** (2002): *Quality of Positioning Methods for Location Based Services*. Präsentation / Privatissimum GeoSki 2002, Feb. 2002, 15 pp. Inst. for Geoinformation, Vienna Univ. of Technology.
- Haselgrübler, Bernhard und Pozenel, Hannes** (1999): *Sicherheitsstandards beim Online-Zahlungsverkehr, SSL & SET*, in: Electronic Commerce und GIS, S. 63-90. Sammelband LV-Abschlussberichte, Timpf, Sabine (Hrsg.). Inst. für Geoinformation & Landesvermessung, Abt. Geoinformation, Techn. Univ. Wien.

- Hatfield, Dale N.** (2002): *A Report on Technical and Operational Issues Impacting The Provision of Wireless Enhanced 911 Services*. 54 pp.
<http://fjallfoss.fcc.gov/ecfs/document/view?id=6513296239>, Capt.: 2003. Federal Communications Commission (FCC), Washington, DC.
- Hauptbahnhof-Wien** (2009): *Masterplan - Wien Hauptbahnhof*. Plandokument, 23.06.2009.
www.hauptbahnhof-wien.at, 310_MasterplanVersN_090623_aktuell_A3.pdf, Zugr.: 2010. ÖBB-Infrastruktur Bau AG, Wien.
- Hein, Günter; Eissfeller, Bernd; Oehler, Veit et al.** (2000): *Synergies Between Satellite Navigation and Location Services of Terrestrial Mobile Communication*. Inst. of Geodesy and Navigation, Univ. FAF Munich. Conf. Paper, pp 535-544. <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=839>, Capt.: 2001. ION GPS 2000, 19.-22. Sep. 2000, Salt Lake City, UT, USA.
- Heine, Gunnar** (1998): *GSM-Signalisierung verstehen und praktisch anwenden*, Grundlagen, Messtechnik, Messbeispiele, Funkschau: Funktechnik. Fachbuch, 1. Aufl., 400 S., ISBN 3-7723-5773-3. Franzis Verlag, Poing, Deutschland.
- Hightower, Jeffrey und Borriello, Gaetano** (2001): *Location Systems for Ubiquitous Computing*. IEEE Computer, Issue 8/2001, Aug. 2001, pp 57-66. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA.
- Hofmann-Wellenhof, Bernhard; Legat, Klaus und Wieser, Manfred** (2003): *Navigation, Principles of Positioning and Guidance*. Textbook, 1. Edn., 427 pp, ISBN 3-211-00828-4. Springer, Wien, New York.
- Hofmann-Wellenhof, Bernhard; Lichtenegger, Herbert und Wasle, Elmar** (2008): *GNSS - Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo and more*. Textbook, 1. Edn., 516 pp, ISBN 978-3-211-73012-6. Springer, Wien, New York.
- Högerl, Norbert; Weber, Robert; Pesec, Peter et al.** (2002): *Realisierung moderner 3D Referenzsysteme für Wissenschaft und Praxis*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation (VGI), Heft 3+4/2002, S. 92-108. Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG), Wien.
- Hogrefe, Dieter** (2005): *Zellulare Netze*, Mobilkommunikation. Vorlesungsunterlagen, 158 S.
http://user.informatik.uni-goettingen.de/~elanmk/mobkoml/material/ss05/03_Zellulare_Netze_2005.pdf, Zugr.: 2009. Lehrstuhl für Telematik, Georg-August-Universität, Göttingen, Deutschland.
- Holma, Harri und Toskala, Antti** (2009): *LTE for UMTS, OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Textbook, 1. Edn., 433 pp, ISBN 978-0-470-99401-6. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, GB.
- Horauer, Martin** (2004): *Clock Synchronization in Distributed Systems*. Dissertation, 117 pp, Eier, Richard & Schmid, Ulrich (Supervisors). Dep. of Computer Technology, Vienna Univ. of Technology.
- Hose, David** (2002): *E-112 - Nicht nur zur Not*. Web-Seite, 08.07.2002.
www.handelsblatt.com/archiv/e112-nicht-nur-zur-not/2180774.html, Zugr.: 2009. Handelsblatt GmbH & Co. KG, Düsseldorf, Deutschland.
- Huang, Haosheng und Gartner, Georg** (2010): *A Survey of Mobile Indoor Navigation Systems*. in: Cartography in Central and Eastern Europe, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pp 305-319. Gartner, Georg und Ortog, Felix (Eds.), ISBN 978-3-642-03293-6. Springer, Berlin, Heidelberg.
- IGEB** (2004): *Interagency GPS Executive Board*. Web-Page. www.igeb.gov, Capt.: 2004. Dennis G. Milbert, Washington, DC.
- IGS** (2001): *International GNSS Services*, Information and Resources. Report, 39 pp.
<http://igsceb.jpl.nasa.gov>, Capt.: 2001. IGS Central Bureau, Pasadena, CA, USA.
- IGS** (2014): *International GNSS Services*. Web-Page. www.igs.org, Capt.: 2014. IGS Central Bureau, Pasadena, CA, USA.

- Imrek, Erich** (1999): *ITRS <-> MGI - eine Gegenüberstellung zweier unterschiedlicher Systeme und ihrer Realisierungen*. Eich- und Vermessungsmagazin (EVM), Heft 93, Dez. 1999, S. 13-19. Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Wien.
- Information-Society** (2011): *eCall*. Web-Page, Activities - eSafety. http://ec.europa.eu/information_society/activities/esafety/ecall/index_en.htm, Capt.: 2011. European Commission, Brussels, Belgium.
- Ingensand, Hilmar und Bitzi, P.** (2001): *Technologien der GSM-Positionierungsverfahren*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), Heft 8-9/2001, S. 286-294. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Irmscher, Klaus** (2009): *Systeme und Anwendungen der Mobilkommunikation*, Skriptum zur LV Mobilkommunikation. 29.01.2009, 107 S. www.informatik.uni-leipzig.de/~irmscher/lehre/skripte/MobilScriptum.pdf, Zugr.: 2009. Univ. Leipzig, Inst. für Informatik.
- IST** (2001a): *Cellular Location Technology*. Project Report, CELLO Consortium, IST-2000-25382-CELLO, 05.11.2001, 44 pp. www.telecom.ntua.gr/cello/documents/CELLO-WP2-VTT-D03-007-Int.pdf, Capt.: 2003. Information Society Technologies (IST).
- IST** (2001b): *Overview of Location Services*. Project Report, IST-1999-14093 LOCUS, Deliverable 1, 19.02.2001, 180 pp. <http://ec.europa.eu/research/ist/leaflets/en/index.html>, Capt.: 2003. Information Society Technologies (IST).
- ITU-R** (2014a): *ITU global standard for international mobile telecommunications 'IMT-Advanced'*. Web-Page, Radiocommunication Sector. www.itu.int/net/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=imt-advanced&lang=en, Capt.: 2014. International Telecommunications Union (ITU), Geneva, Switzerland.
- ITU-R** (2014b): *Radiocommunication Sector (ITU-R)*. Web-Page. www.itu.int/en/ITU-R/Pages/default.aspx, Capt.: 2014. International Telecommunications Union (ITU), Geneva, Switzerland.
- Jäger, Reiner; Müller, Tilman; Saler, Heinz et al.** (2005): *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren*, Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern. Lehrbuch, 340 S., ISBN 3-87907-370-8. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Jandl, Paul** (2011): *Österreichs Nationalhymne wird politisch korrekt*. Web-Seite, 29.12.2011. www.welt.de/kultur/musik/article13788792/Oesterreichs-Nationalhymne-wird-politisch-korrekt.html, Zugr.: 2014. WeltN24 GmbH, Berlin.
- Jobmann, Klaus** (1999): *Mobilfunknetze*, Nachrichtenvermittlungstechnik 1, Kap.12.1: Mobilfunknetze. Skriptum. www.ikt.uni-hannover.de, Zugr.: 2003. Univ. Hannover, Inst. für Allgemeine Nachrichtentechnik.
- Kafka, Gerhard** (2001): *Neue Standards für das WLAN*. Funkschau, Heft 11/2001, S. 43-45. www.funkschau.de, FS0111043.pdf, Zugr.: 2009. WEKA Fachmedien GmbH, Haar, Deutschland.
- Kahmen, Heribert** (1997): *Vermessungskunde*. Lehrbuch, 19. überarb. Aufl., 732 S., ISBN 3-11-015400-5. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- Kahmen, Heribert** (2006): *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. Lehrbuch, 20. völlig neu bearb. Aufl., 679 S., ISBN 978-3-11-018464-8. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- King, Thomas; Lemelson, Hendrik; Färber, Andreas et al.** (2009): *BluePos: Positioning with Bluetooth*. Dep. of Computer Science, Univ. of Mannheim, Germany. Conf. Paper, pp 55-60, ISBN 978-1-4244-5059-6. 6th IEEE Int. Symp. on Intelligent Signal Processing (WISP 2009), 26.-28. Aug. 2009, Budapest, Hungary. IEEE Inc., Los Alamitos, CA, USA.
- Kistenich, Michael** (2005): *Indoor Positioning: Vergleich von Systemen zur Positionsbestimmung und Navigation in Gebäuden*. Diplomarbeit, 86 S., Kahmen, Heribert & Retscher, Günther (Begutachter & Betreuer). Inst. für Geodäsie und Geophysik, FG Ingenieurgeodäsie, Techn. Univ. Wien.

- Klaß, Christian** (2005): *EU gibt Frequenz für Antikollisionsradar für Autos frei*, Abstandsradar als erste EU-weite Ultrabreitbandanwendung. Web-Seite, 19.01.2005. www.golem.de/0501/35746.html, Zugr.: 2008. Klaß & Ihlenfeld Verlag GmbH, Berlin.
- Klaß, Christian** (2006): *Interview: Der Herr der Navis*, SiRF-Gründer Kanwar Chadha über die Zukunft der Navigationssysteme. Web-Seite, 21.12.2006. www.golem.de/0612/49552.html, Zugr.: 2009. Klaß & Ihlenfeld Verlag GmbH, Berlin.
- Kölmel, Bernhard und Wirsing, Martin** (2002): *Nutzererwartungen an Location Based Services - Ergebnisse einer empirischen Analyse*. in: Geoinformation mobil (14. AGIT-Symposium, Jul. 2002, Salzburg), S. 85-97. Zipf, Alexander und Strobl, Josef (Hrsg.), ISBN 3-87907-373-2. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg und Salzburg.
- König, Peter** (2009): *Ortsbestimmung*, Personen und Geräte per GPS, Mobilfunk oder WLAN lokalisieren. Web-Seite, Heise Mobil, 04.02.2009. <http://heise.de/-222459>, Zugr.: 2010. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Koolen, Leo** (2002): *Implementing enhanced emergency service (E-112) for the European citizen*, Regulatory issues for emergency communications in Europe. European Commission. Presentation, 19 pp. www.emtel.etsi.org/Workshop/Session%202/speech_ETSI_Feb_V4.ppt, Capt.: 2009. ETSI, EMTEL Workshop, 26.-27. Feb. 2002, Sophia Antipolis, France.
- Kotanen, Antti; Hännikäinen, Marko; Leppäkoski, Helena et al.** (2003): *Experiments on Local Positioning with Bluetooth*. Tampere Univ. of Technology, Inst. of Digital & Computer Systems, Finland. Conf. Paper, 7 pp, ISBN 0-7695-1916-4. Int. Conf. on Inform. Techn.: Computers & Communications (ITCC 2003). IEEE Inc., Los Alamitos, CA, USA.
- KPMG** (2001): *e- goes m-*, Starting the Mobile Future. Marktstudie, 27 S. www.kpmg.de/ebusiness, Studie.pdf, Zugr.: 2001. KPMG Consulting AG, Deutschland.
- Krasner, Norman; Marshall, Grant und Riley, Wyatt** (2002): *Position Determination Using Hybrid GPS / Cellphone Ranging*. Conf. Paper, ION GPS 2002, 24.-27. Sep., Portland, OR, 12 pp. www.snaptrack.com, Capt.: 2003. SnapTrack Inc., San Jose, CA, USA.
- Krempel, Stefan** (2014): *Grünes Licht im EU-Rat für Auto-NotrufeCall*. Web-Seite, 10.12.2014. <http://heise.de/-2486967>, Zugr.: 2014. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Küpper, Axel** (2005): *Location-based Services*, Fundamentals and Operation. Textbook, ISBN 978-0-470-09231-6. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, GB.
- legend.at** (2000): *Mobile-Commerce Report*. Executive Summary, 12 S. www.legend.at, m-commerce_exsum.pdf, Zugr.: 2001. legend.at Unternehmensberatung GmbH, Wien.
- Lindsey, William C.; Bilgic, Murat; Davis, Gregg et al.** (1999): *GSM Mobile Location Systems*. Technical Report, T1P1.5/99-411R1, 02.07.1999, 26 pp. www.tl.org, Capt.: 2001. Omnipoint Technologies Inc., Colorado Springs, CO, USA.
- Liu, Hui; Darabi, Houshang; Banerjee, Pat et al.** (2007): *Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems*. Dep. of Electrical & Computer Engineering, Univ. of Illinois at Chicago. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, Vol. 37, No. 6, Nov. 2007, pp 1067-1080. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA.
- LTE-Anbieter.info** (2010): *LTE geht in Österreich online*. Web-Seite, 21.10.2010. www.lte-anbieter.info, www.lte-anbieter.info/lte-news/lte-in-oesterreich-gestartet, Zugr.: 2014. 2.0 Promotion GbR, Leipzig, Deutschland.
- LTEmobile** (2014): *LTE-Technik - Femtozellen*. Web-Seite. www.ltemobile.de, www.ltemobile.de/lte-technik/femtozellen/, Zugr.: 2014. Eike Gutt, Bremen, Deutschland.
- Lundqvist, Patrik; Asplund, Henrik und Fischer, Sven** (1998): *Evaluation of Positioning Measurement Systems*. Technical Report, T1P1.5/97-477R2, 15.01.1998, 25 pp. www.tl.org, Capt.: 2001. Ericsson Inc., Richardson, TX, USA.
- Mansmann, Urs** (2010): *Große Unschärfe*, Handys lassen sich nicht genau lokalisieren. c't Magazin für Computer Technik, Heft 8/2010, S. 88-89. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.

- Mil** (1996): *GPS Absolut Positioning Determination*, Concepts, Errors and Accuracies. Manuscript, EM 1110-1-1003, 01.08.1996, 9 pp. www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-1-1003/c-5.pdf, Capt.: 2001. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Mobilkom** (2000a): *Technologie - Die Entwicklung des Mobilfunks*. Web-Seite. http://194.48.132.204/CDA/index/1,1298,NavId_334,00.html, Zugr.: 2000. Mobilkom Austria, Wien.
- Mobilkom** (2000b): *Technologie - GSM*. Web-Seite. http://194.48.132.204/CDA/index/1,1298,NavId_338,00.html, Zugr.: 2000. Mobilkom Austria, Wien.
- Mobilkom** (2009): *Das AI Netz*, Innovationen und Qualität. Web-Seite. www.ai.net/business/ai-netze, Zugr.: 2009. Mobilkom Austria AG, Wien.
- Moeglein, Mark und Krasner, Norman** (1998): *An Introduction to SnapTrack Server-Aided GPS Technology*. SnapTrack Inc. Conf. Paper, pp 333-342. ION GPS 1998, 15.-18. Sep., Nashville, TN, USA.
- Mohaisen, Abedelaziz; Hong, Dowon und Nyang, DaeHun** (2008): *Privacy in Location Based Services: Primitives toward the Solution*. Proceedings, Kim, Jinhwa & Delen, Dursun (Eds.), Vol. 1, pp 572-579, ISBN 978-0-7695-3322-3. 4th Intern. Conf. on Networked Computing & Advanced Information Management (NCM 2008), 02.-04. Sep. 2008, Gyeongju, Korea. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA.
- Motorola** (2001): *Overview of 2G LCS Technologies and Standards*. Technical Report, LCS-010019, 14 pp, 3GPP TSG SA2 LCS Workshop, 11.-12. Jan. 2001, London. www.3gpp.org/FTP/workshop/Archive/0101LCS/Docs/PDF/LCS-010019.pdf, Capt.: 2002. Motorola Inc., Schaumburg, IL, USA.
- Müller, Arndt** (2014): *Wird uns unser Auto bald ausspionieren?*, Das vernetzte Fahren, bei dem Autos untereinander und mit Verkehrsleitsystemen kommunizieren, wird Realität. Web-Seite, e!trend, 10.01.2014. www.trend.at/articles/1402/585/371404/wird-auto, Zugr.: 2014. News Network Internetservice GmbH, Wien.
- Navratil, Gerhard und Grum, Eva** (2007): *What makes Location Based Services fail?* in: Location Based Services and TeleCartography, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pp 59-72. Gartner, Georg; Cartwright, William und Peterson, Michael P. (Eds.), ISBN 3-540-36727-6. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- NENA** (2010): *9-1-1 Statistics*. Web-Page. www.nena.org/911-statistics, Capt.: 2010. National Emergency Number Association (NENA), Alexandria, VA, USA.
- NGMN** (2014): *Next Generation Mobile Networks*. Web-Page. www.ngmn.org, Capt.: 2014. NGMN Ltd., Frankfurt am Main, Germany.
- Nokia-8110** (2009): *Nokia 81xx*, Informationen über die Handys Nokia 8110, 8110i, 8148, 8148i. Web-Seite. www.jenderny.de/81xx/index.html, Zugr.: 2009. Impr. n.a.
- Opitz, Rudolf** (2009): *Evolution der Netze*, Die Zukunft des mobilen Surfens. Web-Seite, Heise Mobil, 19.06.2009. <http://heise.de/-222569>, Zugr.: 2009. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- ORF** (2014): *Das Binnen-I bleibt unregelt*, Meinungen "sehr weit auseinander". Web-Seite, news.ORF.at, 30.10.2014. <http://orf.at/stories/2251715/2251716/>, Zugr.: 2014. ORF Online und Teletext GmbH & Co. KG, Wien.
- Ovrebo, Olav Anders und Schwan, Ben** (2002): *Highspeed-Doppelfunker*, UMTS und WLAN. Web-Seite, Heise Mobil, 24.04.2002. <http://heise.de/-222587>, Zugr.: 2009. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Pacific-Bell** (1998): *Recommendations for Location Services Positioning Method Standardisation*. Technical Report, T1P1.5/98-441, Sep. 1998, 8 pp. www.t1.org, Capt.: 2001. Pacific Bell Mobile Services, Lenox Park, Brookhaven, GA, USA.
- Pakalski, Ingo** (2005): *Automatisches EU-weites Notrufsystem für Neuwagen geplant*, Kraftfahrzeuge versenden bei Unfällen automatisch Notrufe. Web-Seite, 04.02.2005. www.golem.de/0502/36107.html, Zugr.: 2008. Klauß & Ihlenfeld Verlag GmbH, Berlin.

- Parkvall, Stefan und Astely, David** (2009): *The Evolution of LTE towards IMT-Advanced*. Ericsson Research. Journal of Communications, Vol. 4, No. 3, Apr. 2009, pp 146-154.
www.jocm.us/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=76&id=294, Capt.: 2009.
Engineering and Technology Publishing, Rowland Heights, CA, USA.
- Paul-Morandini, Olivier** (2006): *Caller location from a Citizen point of view*. European Emergency Number Association (EENA). Presentation, 8 pp.
www.eena.org/ressource/static/files/Lisbon_3rd_March_2006.ppt, Capt.: 2009. Meeting, 03.03.2006, SNBPC Headquarter, Lisbon, Portugal.
- Persson, Christian** (2009): *Desolates GPS: Navis bald orientierungslos?* Web-Seite, 21.05.2009.
<http://heise.de/-219811>, Zugr.: 2009. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Petrova, Krassie und Wang, Bin** (2008): *Location-based Services: A Roadmap for New Zealand*. Auckland Univ. of Technology, Dep. Computer and Information Sciences. Proceedings, Mann, Samuel & Lopez, Mike (Eds.), pp 93-100. <http://naccq08.unitec.ac.nz/proceedings/papers/93.pdf>, Capt.: 2009. 21st Annual Conf. of the National Advisory Committee on Computing Qualifications (NACCQ 2008), Auckland, New Zealand.
- Pohl, Heinz-Dieter** (2014): *Zur Diskussion um das Binnen-I und zum "feministischen Sprachgebrauch"*. Publikation, 23.11.2014, Alpen Adria Univ. Klagenfurt, Inst. für Sprachwissenschaft und Computerlinguistik, 18 S. http://members.chello.at/heinz.pohl/Fem_Dt.pdf, Zugr.: 2014. Heinz-Dieter Pohl, Klagenfurt.
- QCT** (2009a): *gpsOne: Because Your Position in Life Really Does Matter*. Web-Page, QCT Connect.
www.qctconnect.com/products/gpsone.html, Capt.: 2009. Qualcomm Inc., San Diego, CA, USA.
- QCT** (2009b): *Qualcomm CDMA Technologies (QCT)*. Web-Page, QCT Connect.
www.qctconnect.com, Capt.: 2009. Qualcomm Inc., San Diego, CA, USA.
- Qualcomm** (2014): *Qualcomm Home*. Web-Page. www.qualcomm.com, Capt.: 2014. Qualcomm Inc., San Diego, CA, USA.
- Queisser, Hans** (1985): *Kristallene Krisen*, Mikroelektronik - Wege der Forschung, Kampf um Märkte. Fachbuch, 350 S., ISBN 3-492-02947-7. Piper Verlag, München, Zürich.
- Rappaport, Theodore; Reed, Jeffrey und Woerner, Brian** (1996): *Position Location Using Wireless Communications on Highways of the Future*, Communications in the Intelligent Transportation System. Communications Magazine, Vol. 34, No. 10, Oct. 1996, pp 33-41, ISSN 0163-6804. IEEE, Inc., Los Alamitos, CA, USA.
- Redl, Siegmund** (2007): *HSPA+ als High-speed-Evolution zu LTE*. Web-Seite.
www.elektroniknet.de/home/kommunikation/fachwissen/, Zugr.: 2009. WEKA Fachmedien GmbH, Haar, Deutschland.
- Reed, Jeffrey; Krizman, Kevin und Woerner, Brian** (1998): *An Overview of the Challenges and Progress in Meeting the E-911 Requirement for Location Services*, Wireless Geolocation Systems and Services. Communications Magazine, Vol. 36, No. 4, Apr. 1998, pp 30-37, ISSN 0163-6804. IEEE, Inc., Los Alamitos, CA, USA.
- Reißmann, Günter** (1980): *Die Ausgleichsrechnung*, Grundlagen und Anwendungen in der Geodäsie. 5. erw. u. bearb. Aufl., 368 S. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Reitmayr, Gerhard und Schmalstieg, Dieter** (2003): *Location Based Applications for Mobile Augmented Reality*. Vienna Univ. of Technology. Proceedings of the 4th Australasian User Interface Conference, Australian Computer Society (Ed.), pp 65 - 73, ISBN 0-909925-96-8.
www.ims.tuwien.ac.at/publications/tuw-137413, Capt.: 2009.
- Retscher, Günther und Kealy, Allison** (2005): *Ubiquitous Positioning Technologies for Intelligent Navigation Systems*. Joint 2nd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC '05) & 1st Ultra-Wideband Expert Talk (UET '05), 17.03.2005, Hannover. Conf. Paper, pp 99-108, ISBN 3-8322-3746-1. Shaker Verlag, Aachen, Deutschland.
- Retscher, Günther und Thienelt, Michael** (2004): *NAVIO – A Navigation and Guidance Service for Pedestrians*. Inst. of Geodesy & Geophysics, Vienna Univ. of Technology. Journal of Global Positioning Systems, Vol. 3, No. 1-2, pp 208-217, ISSN 1446-3156. Intern. Association of Chinese Professionals in Global Positioning Systems (CPGPS), Calgary, Canada.

- Retscher, Günther und Thienelt, Michael** (2006): *A Multi-Sensor Personal Positioning System for combined Indoor / Outdoor Environments*. Inst. of Geodesy & Geophysics, Engineering Geodesy, Vienna Univ. of Technology. Paper, 8 pp.
www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/PS/Retscher.pdf, Capt.: 2009. 3rd IAG / 12th FIG Symposium, 22.-24. May 2006, Baden / Vienna.
- Riemer, Kai** (2000): *Netzübergreifende Dienste und Anwendungen*, Veranstaltung Kommunikationssysteme. Präsentation, 23 S. [www.wi.uni-muenster.de, LCS-010019.pdf](http://www.wi.uni-muenster.de/LCS-010019.pdf),
Zugr.: 2001. Westfälische Wilhelms-Univ., Inst. für Wirtschaftsinformatik, Münster, Deutschland.
- Robson, Julius** (2009): *Die LTE/SAE-Test-Initiative (LSTI)*, Begleiter auf dem Weg von der Spezifikation zur kommerziellen Einführung. Web-Seite. www.ltemobile.de/lte-technik/ltesae-fachartikel/, Zugr.: 2014. Eike Gutt, Bremen, Deutschland.
- Ruutu, Ville** (1998): *Preliminary Results of OTD Field Trial System*. Technical Report, T1P1.5/98-019, 16.01.1998, 9 pp. www.tl.org, Capt.: 2001. Nokia Research Center, Finland.
- Rysavy-Research** (2009): *HSPA to LTE-Advanced*, 3GPP Broadband Evolution to IMT-Advanced (4G). White Paper, Sep. 2009, 118 pp.
www.3gamericas.org/documents/3G_Americas_RysavyResearch_HSPA-LTE_Advanced_Sept2009.pdf, Capt.: 2009. 3G Americas, Bellevue, WA, USA.
- Sauter, Martin** (2008): *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme*, Von UMTS und HSDPA, GSM und GPRS zu Wireless LAN und Bluetooth Piconetzen. Lehrbuch, 3. erw. Aufl., 424 S., ISBN 978-3-8348-0397-9. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden.
- Sauter, Martin** (2009): *Beyond 3G - Bringing Networks, Terminals and the Web Together*, LTE, WiMAX, IMS, 4G Devices and the Mobile Web 2.0. Textbook, 1. Edn., 354 pp, ISBN 978-0-470-75188-6. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, GB.
- Sauter, Martin** (2011): *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme*, UMTS, HSDPA und LTE, GSM, GPRS und Wireless LAN. Lehrbuch, 4. überarb. u. erw. Aufl., 420 S., ISBN 978-3-8348-1407-4. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Sauter, Martin** (2013): *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme*, UMTS, HSPA und LTE, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth. Lehrbuch, 5. überarb. u. erw. Aufl., 409 S., ISBN 978-3-658-01461-2. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden.
- Sawall, Achim** (2009): *Alcatel-Lucent testet CoMP für mobile 5 MBit/s in Berlin*, Höhere Übertragungsraten auch im Uplink und an Funkzellenrändern. Web-Seite, 16.10.2009.
www.golem.de/0910/70529.html, Zugr.: 2009. Klauf & Ihlenfeld Verlag GmbH, Berlin.
- Schieler, Karl und Hauk, Elmar** (2001): *Instruktion für die Feldarbeit - Österreichische Waldinventur 2000/2002*. Dienstanweisung, Fassung 2001, 199 S., ISBN 3-901347-29-1.
<http://bfw.ac.at/700/700.html>, Zugr.: 2009. Forstliche Bundesversuchsanstalt (FBVA) Wien, Waldforschungszentrum.
- Schnabel, Patrick** (2014a): *Breitband über Satellit*. Web-Seite, Elektronik Kompendium.
www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1207011.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014b): *Breitbandtechnik*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1304161.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014c): *C-450 Netz in Deutschland*. Web-Seite, Elektronik Kompendium.
www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0910131.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014d): *Datenübertragung im Mobilfunk*. Web-Seite, Elektronik Kompendium.
www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0910141.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014e): *Die Geschichte des Mobilfunks*. Web-Seite, Elektronik Kompendium.
www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0910121.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.

- Schnabel, Patrick** (2014f): *Funknetze - Funksysteme*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/0410041.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014g): *Glasfaser-Netzarchitektur*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/1403191.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014h): *GPRS - General Packet Radio Service*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/0411241.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014i): *H2U - Higer Capacity to UMTS*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/0910241.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014j): *HSCSD - High Speed Circuit Switched Data*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/0509251.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014k): *HSPA - Highspeed Paket Access*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/1301141.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014l): *HSPA+ / HSPA Evolution*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/1402201.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014m): *IEEE 802.11 / WLAN-Grundlagen*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/net/0610051.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014n): *IEEE 802.16 / WiMAX*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/net/0904211.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014o): *IMT-2000 - International Mobile Telecommunications at 2000 MHz*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/0910211.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014p): *Iridium*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/0311111.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014q): *Lichtwellenleiter (LWL/Glasfaser)*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/0301282.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014r): *NGN - Netzarchitektur*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/1307031.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014s): *NGN - Next Generation Network*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/1103261.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014t): *Ortung und Positionsbestimmung mit Mobilfunk*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/1201061.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014u): *Sprach-Codecs im Mobilfunk*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/1402251.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014v): *UMTS - Netzarchitektur*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/0910221.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.

- Schnabel, Patrick** (2014w): *VDSL2*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/1403191.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014x): *WAP - Wireless Applikation Protocol*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/kom/0910101.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schnabel, Patrick** (2014y): *WPAN - Wireless Personal Area Network*. Web-Seite, Elektronik Kompendium. www.elektronik-kompndium.de/sites/net/1401061.htm, Zugr.: 2014. Patrick Schnabel, Ludwigsburg, Deutschland.
- Schulzki-Haddouti, Christiane** (2006): *Selbstentblößung per Handy, Datenschutz und Gefahren per Handy*. Web-Seite, Heise Mobil Special, 31.05.2006. www.heise.de/mobile/artikel/73650, Zugr.: 2006. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Seeber, Günter** (1989): *Satellitengeodäsie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Lehrbuch, 489 S., ISBN 3-11-010082-7. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- Seeber, Günter** (1993): *Satellite Geodesy, Foundations, Methods and Applications*. Textbook, 531 pp, ISBN 3-11-012753-9. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- Seeber, Günter** (2003): *Satellite Geodesy*. Textbook, 2. compl. rev. and ext. Edn., 589 pp, ISBN 3-11-017549-5. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- Seow, Chee Kiat** (2009): *Localization of Mobile Devices*, In Multipath induced Environments. Dissertation, Nanyang Techn. University, Singapore, 1. Edn., 161 pp, ISBN 978-3-639-19040-3. VDM Verlag, Saarbrücken, Deutschland.
- Sheynblat, Len** (2001): *Wireless Assisted GPS: Personal Location for GSM and GSM Evolution*. Presentation, 11.01.2001, 27 pp. www.snaptrack.com, LCS-010004.pdf, Capt.: 2003. SnapTrack Inc., San Jose, CA, USA.
- Siemens** (2009): *Wenn Autos kommunizieren*. hi!tech, Innovationsmagazin Siemens Österreich, Heft 3/09, Nov. 2009, S. 64-65. Siemens AG Österreich, Wien.
- Sietmann, Richard** (2001): *Quo vadis Mobilfunk?*, Nebenbuhler und Nachfolger von UMTS. c't Magazin für Computer und Technik, Heft 5/2001, 26.02.2001, S. 94-101. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Simon, Anne-Catherine** (2014): *"Gendergerechte" Sprache: "Professx" und andere Sprachmutanten*. Web-Seite, 28.11.2014. http://diepresse.com/home/bildung/bildungallgemein/4607447/GendergerechteSprache_Professx-und-andere-Sprachmutanten, Zugr.: 2014. Die Presse Verlags-Gesellschaft m.b.H. & Co. KG, Wien.
- Skipwith, Donald B.; Narasimha, M. J. und Sheno, Kishan** (1999a): *Field Trial Results of an E-OTD Mobile Location System*. Technical Report, T1P1.5/99-010, Jan. 1999, 6 pp. www.t1.org, Capt.: 2001. Telecom Solutions, SymmetriCom, San Jose, CA, USA.
- Skipwith, Donald B.; Sheno, Kishan und Narasimha, M. J.** (1999b): *Improving the Accuracy of Location Estimates using a Simple Multipath Mitigation Algorithm*. Technical Report, T1P1.5/99-012, Jan. 1999, 5 pp. www.t1.org, Capt.: 2001. Telecom Solutions, SymmetriCom, San Jose, CA, USA.
- Smith, Jessica; Kealy, Allison und Williamson, Ian** (2001): *Loacation Based Services - The Underlying Technology*. Paper, 15 pp. www.geom.unimelb.edu.au, Capt.: 2001. Dep. of Geomatics, Univ. of Melbourne, Australia.
- SnapTrack** (2003): *SnapTrack Home*. Web-Page. www.snaptrack.com, Capt.: 2003. SnapTrack Inc., San Jose, CA, USA.
- Sokolov, Daniel** (2004): *30 Jahre Mobilfunk in Österreich*. Web-Seite, 05.05.2004. <http://heise.de/-98121>, Zugr.: 2014. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Sokolov, Daniel** (2009): *Warten auf Long Term Evolution, LTE-Testnetz in Innsbruck*. Web-Seite, 14.09.2009. <http://heise.de/-763735>, Zugr.: 2009. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.

- Staudinger, Martin und Haselgrübler, Bernhard** (2002): *Die Genauigkeit der Ortsbestimmung mit Mobilfunkgeräten bei der automatischen Standortbestimmung in Notfällen*. in: Geoinformation mobil (14. AGIT-Symposium, Jul. 2002, Salzburg), S. 150-156. Zipf, Alexander und Strobl, Josef (Hrsg.), ISBN 3-87907-373-2. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg und Salzburg.
- Steiniger, Stefan; Neun, Moritz und Edwardes, Alistair** (2006): *Foundations of Location Based Services*, Lecture Notes on LBS, Cartography for Swiss Higher Education (CartouCHE). 28 pp. www.e-cartouche.ch, Capt.: 2009. Zurich, Switzerland.
- Su, Chengling** (2007): *Anwendungspotential der mobilfunkgestützten Satellitenpositionierung (A-GNSS) zur Frühwarnung und Rettung bei Hochwasser- oder Eisstoßkatastrophen*. Dissertation, 172 S., Wunderlich, Thomas & Weber, Robert (Betreuer). Inst. für Geodäsie, GIS und Landmangement, Lehrstuhl für Geodäsie, Techn. Univ. München.
- T1P1.5-LCS** (1998a): *Evaluation Sheet for Enhanced Observed Time Difference (E-OTD) Method*. Technical Report, T1P1.5/98-021R8, 17.08.1998, 29 pp. www.tl.org, Capt.: 2001. T1P1.5 LCS: Ericsson, Motorola, Nokia et al.
- T1P1.5-LCS** (1998b): *Evaluation Sheet for the Uplink TOA Positioning Method*. Technical Report, T1P1.5/98-034R6, 19.08.1998, 13 pp. www.tl.org, Capt.: 2001. T1P1.5 LCS: Ericsson.
- T1P1.5-LCS** (1998c): *Evaluation Worksheet for Assisted GPS*. Technical Report, T1P1.5/98-132R3, 03.06.1998, 14 pp. www.tl.org, Capt.: 2001. T1P1.5 LCS: Ericsson, SnapTrack.
- TecChannel** (2009a): *4G-Mobilfunktechnologie lässt auf sich warten*, Netzbetreiber forcieren 3G-Technologien wie HSPA+. Web-Seite, 12.05.2009. www.tecchannel.de/kommunikation/news/2018871/4g_mobilfunktechnologie_laesst_auf_sich_warten/, Zugr.: 2009. IDG Business Media GmbH, München.
- TecChannel** (2009b): *Nokia: Keine Zukunft für WiMAX*, LTE vielversprechender. Web-Seite, 03.04.2009. www.tecchannel.de/news/1998493/nokia_gibt_wimax_keine_chancen_mehr/, Zugr.: 2009. IDG Business Media GmbH, München.
- Thomä, Reiner** (1996): *GPS an der TU Ilmenau*. Web-Seite. <http://ikmcipl.e-technik.tu-ilmenau.de>, Zugr.: 2000. Toralf Schumann, Inst. für Kommunikations- u. Messtechnik, Techn. Univ. Ilmenau, Deutschland.
- Thuraya** (2014): *Notfall! - vorgesorgt?* Web-Seite. www.thuraya.de/notfall-vorgesorgt.html, Zugr.: 2014. Expeditionstechnik Därr GmbH, München.
- Titz, Helmut; Höggerl, Norbert; Imrek, Erich et al.** (2010): *Realisierung und Monitoring von ETRS 89 in Österreich*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation (VGI), Heft 2/2010, S. 52-61. Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG), Wien.
- Torge, Wolfgang und Müller, Jürgen** (2012): *Geodesy*. Textbook, 4. Edn., 433 pp, ISBN 978-3-11-020718-7. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- Trimble** (2000): *Ensign & Ensign XL*, Hand-held marine navigation system. Web-Page. www.trimble.com/products/catalog/consumer/ensign.htm, Capt.: 2000. Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, CA, USA.
- TruePosition** (2004): *An Examination of U-TDOA and Other Wireless Location Technologies, Their Evolution and Their Impact on Today's Wireless Market*. White Paper, 10 pp. www.trueposition.com/web/guest/positioning-technology, TruePosition_WP_2004.pdf, Capt.: 2009. TruePosition Inc., Berwyn, PA, USA.
- TruePosition** (2010): *TruePosition Hybrid Location Solutions*. Web-Page. www.trueposition.com/web/guest/hybrid-location-solutions, Capt.: 2010. TruePosition Inc., Berwyn, PA, USA.
- TruePosition** (2014): *Serving Mobile Location Center (SMLC)*. Web-Page. www.trueposition.com/products/truefix-platform/smlc/, Capt.: 2014. TruePosition, Berwyn, PA, USA.

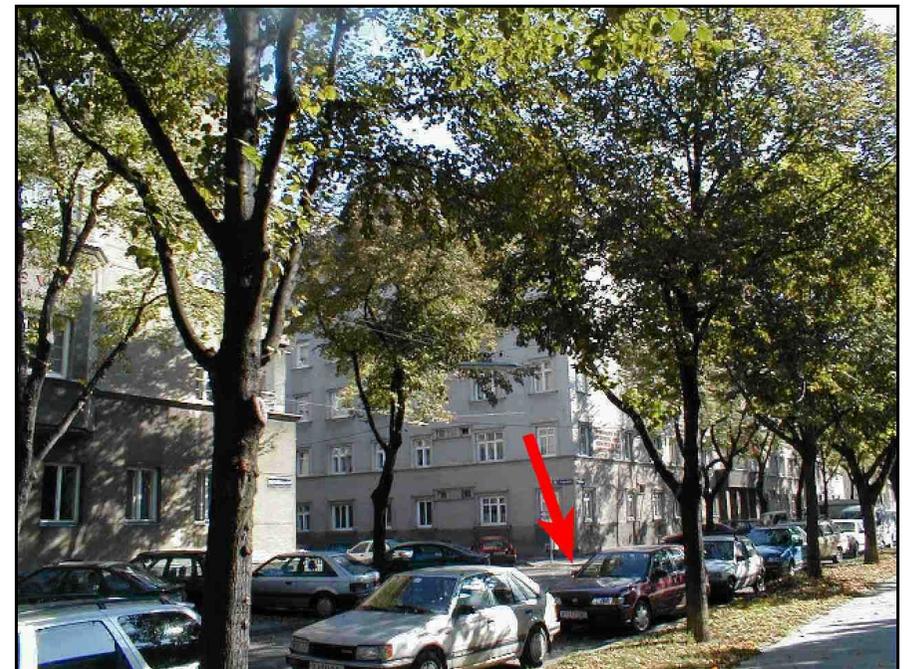
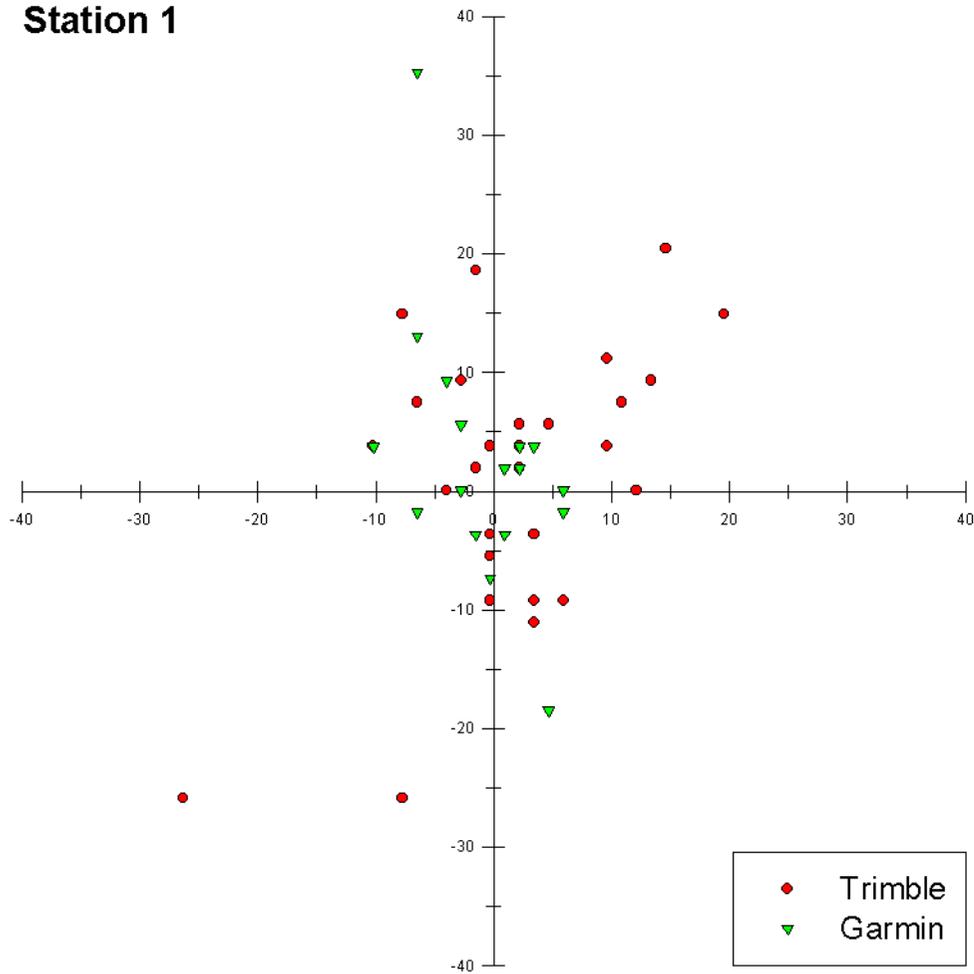
- Tsujino, Teruhisa** (2005): *Effectiveness of the Quasi-Zenith Satellite System in Ubiquitous Positioning*. Science & Technology Trends, No. 16, Jul. 2005, pp 88-101.
www.nistep.go.jp/achiev/ftx/eng/stfc/stt016e/qr16pdf/STTqr1607.pdf, Capt.: 2009. National Inst. of Science and Technology Policy (NISTEP), Tokyo, Japan.
- UMTS-Forum** (2009): *Mobile Broadband Evolution: the roadmap from HSPA to LTE*. White Paper, Feb. 2009, 40 pp. www.umts-forum.org/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,2089/Itemid,214/, Capt: 2009. UMTS Forum, London, GB.
- UMTSlink** (2009a): *3. Mobilfunkgeneration - IMT2000*. Web-Seite.
www.umtslink.at/index.php?pageid=imt2000, Zugr.: 2009. R. Riemer.
- UMTSlink** (2009b): *Geschichte des Mobilfunks*. Web-Seite.
www.umtslink.at/index.php?pageid=mobilfunkgeschichte, Zugr.: 2009. R. Riemer.
- UMTSlink** (2009c): *GPRS Einführung*. Web-Seite.
www.umtslink.at/index.php?pageid=GPRS_GPRS_einfuehrung, Zugr.: 2009. R. Riemer.
- UMTSlink** (2009d): *Grundlagen von UMTS*. Web-Seite.
www.umtslink.at/index.php?pageid=umts_grundlage, Zugr.: 2009. R. Riemer.
- UMTSlink** (2009e): *GSM - Entwicklung in Österreich*. Web-Seite.
www.umtslink.at/index.php?pageid=GSM_gsm_history_austria, Zugr.: 2009. R. Riemer.
- UMTSlink** (2009f): *HSCSD Grundlagen*. Web-Seite. www.umtslink.at/index.php?pageid=hscsd_basics, Zugr.: 2009. R. Riemer.
- ViewRanger** (2014): *ViewRanger GPS*. Web-Seite. <http://www.viewranger.com/de>, Zugr.: 2014. Augmentra Ltd., Cambridge, GB.
- Villier, Eric und Lopes, Luis** (1998): *Updated Simulation Results for the Enhanced OTD Positioning Mechanism*. Technical Report, T1P1.5/98-246r1, 18.07.1998, 14 pp. www.tl.org, Capt.: 2001. Motorola Inc., Arlington Heights, IL, USA.
- VOR** (2000): *Elektronische Fahrplanauskunft 1999-2000*. CD-ROM (EFA win). Verkehrsverbund Ost-Region Ges.m.b.H, Wien.
- Walke, Bernhard** (2000): *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*, Grundlagen, GSM, UMTS und andere Mobilfunknetze. Band 1 / 2. Lehrbuch, 2. überarb. u. erw. Aufl., 535 S., ISBN 3-519-16430-2. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden.
- Walke, Bernhard; Althoff, Marc Peter und Seidenberg, Peter** (2002): *UMTS - Ein Kurs*, Universal Mobile Telecommunications System. Lehrbuch, 2. überarb. Aufl., 344 S., ISBN 3-935340-22-2. Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt, Deutschland.
- Wang, Bin** (2008): *Mobile Location-Based Services in New Zealand*. Dissertation, 52 pp, Petrova, Krassie (Prim. Supervisor).
http://repositoryaut.lconz.ac.nz/bitstream/10292/497/5/WangB_a.pdf, Capt.: 2009. Auckland Univ. of Technology, New Zealand.
- Wang, Shu; Min, Jungwon und Yi, Byung** (2008): *Location Based Services for Mobile: Technologies and Standards*. LG Electronics MobileComm USA Inc. Presentation, 123 pp.
<http://to.swang.googlepages.com/ICC2008LBSforMobilesimplifiedR2.pdf>, Capt: 2009. IEEE ICC 2008, 19.-23. May 2008, Beijing, China.
- Weber, Robert; Walter, Gerhard und Klotz, Stefan** (1995): *GPS-relevante Koordinatensysteme und deren Bezug zum Österreichischen Festpunktfeld*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation (VGI), Heft 4/95, S. 190-200. Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG), Wien.
- Wikipedia** (2010a): *County (Vereinigte Staaten)*. Web-Seite.
http://de.wikipedia.org/wiki/County_%28Vereinigte_Staaten%29, Zugr.: 2010. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2010b): *New York City*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/New_York_City, Zugr.: 2010. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.

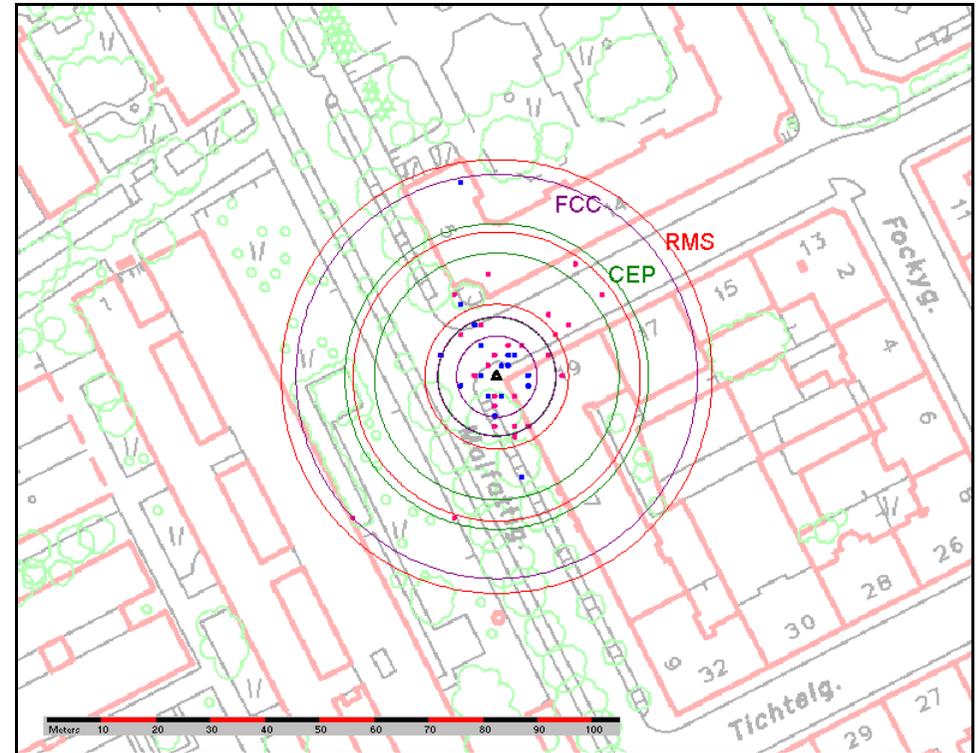
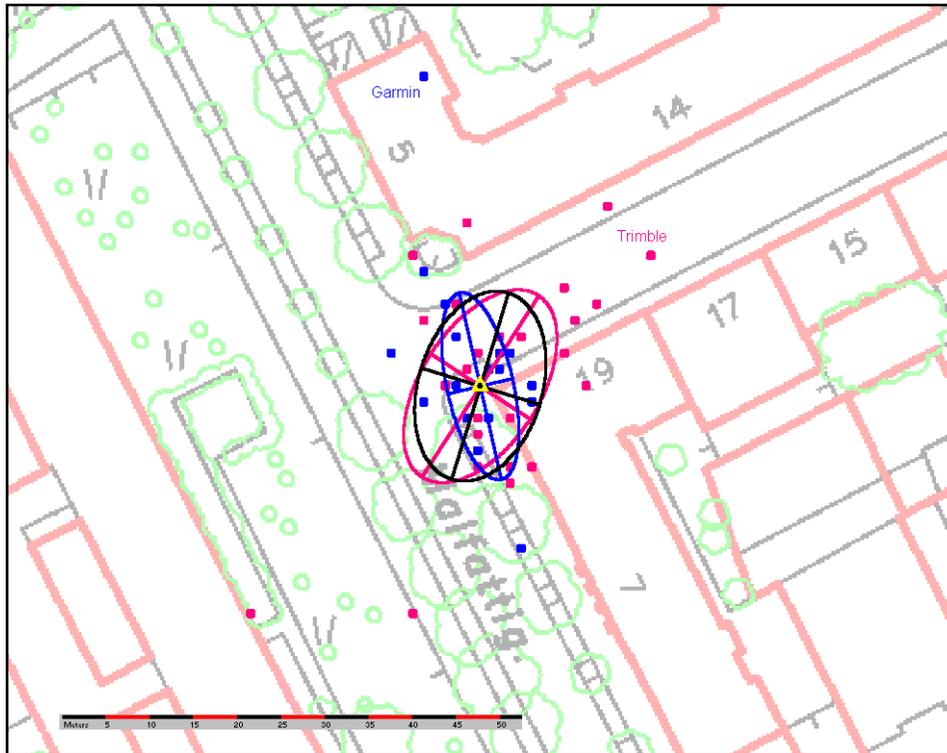
- Wikipedia** (2010c): *Vereinigte Staaten*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Vereinigte_Staaten, Zugr.: 2010. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014a): *3GPP Long Term Evolution*. Web-Page. http://en.wikipedia.org/wiki/3GPP_Long_Term_Evolution, Capt.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014b): *3rd Generation Partnership Project*. Web-Seite. <http://de.wikipedia.org/wiki/3GPP>, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014c): *Advanced Mobile Phone Service*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Advanced_Mobile_Phone_Service, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014d): *Binnen-I*. Web-Seite. <http://de.wikipedia.org/wiki/Binnen-I>, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014e): *E-UTRA*. Web-Page. <http://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA>, Capt.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014f): *Galileo (Satellitennavigation)*. Web-Seite. [http://de.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(Satellitennavigation\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Galileo_(Satellitennavigation)), Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014g): *Gender Gap (Linguistik)*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Gender_Gap_%28Linguistik%29, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014h): *General Packet Radio Service*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/General_Packet_Radio_Service, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014i): *Geschlechtergerechte Sprache*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Geschlechtergerechte_Sprache, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014j): *Global Positioning System (GPS)*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014k): *Hans-Joachim Queisser*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Hans-Joachim_Queisser, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014l): *Heteronormativität*. Web-Seite. <http://de.wikipedia.org/wiki/Heteronormativit%C3%A4t>, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014m): *Long Term Evolution*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Long_Term_Evolution, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014n): *Next Generation 9-1-1*. Web-Page. http://en.wikipedia.org/wiki/Next_Generation_9-1-1, Capt.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014o): *Nokia 5800*. Web-Page. http://en.wikipedia.org/wiki/Nokia_5800_XpressMusic, Capt.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014p): *Nokia 7110*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Nokia_7110, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014q): *Österreichische Bundeshymne*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/%C3%96sterreichische_Bundeshymne, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014r): *Queer-Theorie*. Web-Seite. <http://de.wikipedia.org/wiki/Queer-Theorie>, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.

- Wikipedia** (2014s): *Secure Electronic Transaction (SET)*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Secure_Electronic_Transaction, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014t): *SiRF*. Web-Page. <http://en.wikipedia.org/wiki/SiRF>, Capt.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014u): *Thomas S. Kuhn*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Thomas_S._Kuhn, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014v): *Waldinventur*. Web-Seite. <http://de.wikipedia.org/wiki/Waldinventur>, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014w): *Wien Hauptbahnhof*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Wien_Hauptbahnhof, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2014x): *Wireless Application Protocol (WAP)*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Wireless_Application_Protocol, Zugr.: 2014. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2015a): *Bluetooth*. Web-Seite. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>, Zugr.: 2015. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2015b): *Brandmelder*. Web-Seite. <http://de.wikipedia.org/wiki/Brandmelder>, Zugr.: 2015. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2015c): *Energy Harvesting*. Web-Seite. http://de.wikipedia.org/wiki/Energy_Harvesting, Zugr.: 2015. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2015d): *Geocast*. Web-Seite. <http://de.wikipedia.org/wiki/Geocast>, Zugr.: 2015. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wikipedia** (2015e): *Leitpfosten*. Web-Seite. <http://de.wikipedia.org/wiki/Leitpfosten>, Zugr.: 2015. Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wilde, Graham; Saunders, Jake; Melcher, John et al.** (2004): *E-112 Issues and Answers, Recommendations and Insight for the Optimal Planning and Implementation of E-112, Emergency Wireless Location for the European Union*. White Paper, 33 pp. www.trueposition.com, Capt.: 2009. TruePosition Inc., Berwyn, PA, USA.
- Williams, David H.** (2005): *The Deadline for the E-911 Mandate Approaches... Where Do Things Stand?* Web-Page, Directions Magazine, 30.11.2005. www.directionsmag.com/entry/the-deadline-for-the-e911-mandate-approaches-where-do-things-stand/123293, Capt.: 2009. Directions Media.
- Wilmes, Thorsten und Raubal, Martin** (2005): *Technische Nutzbarkeitsanalyse von Triggered Location Services*. in: Angewandte Geoinformatik (17. AGIT-Symposium, Jul. 2005, Salzburg), S. 780-789. Strobl, Josef; Blaschke, Thomas und Griesebner, Gerald (Hrsg.), ISBN 3-87907-422-4. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- WiMAX-Forum** (2009): *WiMAX, HSPA+ and LTE: A Comparative Analysis*. White Paper, Nov. 2009, 36 pp. www.wimaxforum.org, Capt.: 2009. WiMAX Forum, Clackamas, OR, USA.
- Wirsing, Martin** (2002): *Mobile Business: Erfolgspotentiale und Geschäftsmodelle für Location Based Services*. Diplomarbeit, 192 S., Stucky, Wolffried (Begutachter), Kölmel, Bernhard (Betreuer). www.aifb.uni-karlsruhe.de/Lehre/Sommer2003/MoMaTIK/DA_Location_Based_Services.pdf, Zugr.: 2009. Inst. für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren, Univ. Karlsruhe (TH).
- Wohlert, Randolph** (2000): *Location Based Services - Service Requirements Document*. GSMNA doc 069/00 Rev1, 14.01.2000, 23 pp. www.gsmworld.com, Capt.: 2001. The North American Interest Group of the GSM MoU Association, Atlanta, GA, USA.
- Wunderlich, Thomas** (2003): *Geolokalisation – eine Position kennt ihre Umgebung*. in: 12. Int. Geodätische Woche Obergurgl, 16.-22. Feb. 2003, S. 178-192. Chesi, Günter und Weinold, Thomas (Hrsg.). Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Wunderlich, Thomas; Su, Chengling; Barth, Wolf et al.** (2006): *Die mobilfunkgestützte Satellitenpositionierungstechnik AGPS – Wireless Assisted GPS*. Geomatik Schweiz, Heft

- 4/2006, S. 224-228. Schweizerischer Verband für Geomatik und Landmanagement. SIGMedia AG, Scherz, Schweiz.
- Wylie-Green, Marilyn P.** (1998): *Results of OTD Location Simulations*. Technical Report, T1P1.5/98-243, 02.06.1998, 11 pp. www.t1.org, Capt.: 2001. Nokia Research Center, Piscataway, NY, USA.
- Zagami, James; Parl, Steen; Bussgang, Julian et al.** (1998): *Providing Universal Location Services Using a Wireless E-911 Location Network*, Wireless Geolocation Systems and Services. Communications Magazine, Vol. 36, No. 4, Apr. 1998, pp 66-71, ISSN 0163-6804. IEEE, Inc., Los Alamitos, CA, USA.
- Zarzer, Brigitte** (2001): *ETSI-Standard auch in Österreich, Überwachungsverordnung für Handys soll bereits in den nächsten Wochen in Kraft treten*. Web-Seite, Telepolis, 31.10.2001. www.telepolis.de/deutsch/inhalt/te/11021/1.html, Zugr.: 2002. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Zhao, Yongxiang; Shen, Qiang und Zhang, Lianmeng** (2011): *A Novel High Accuracy Indoor Positioning System Based on Wireless Lans*. Progress In Electromagnetics Research C (PIERS), Vol. 24, pp 25-42, ISSN 1937-8718. EMW Publishing.
- Zivadinovic, Dusan** (2009): *Erste Breitbandmobilnetze auf LTE-Grundlage*. Web-Seite, Heise Netze, 14.04.2009. <http://heise.de/-212846>, Zugr.: 2009. Heise Medien GmbH & Co. KG, Hannover.
- Zogg, Jean-Marie** (2009): *Die Modernisierung des zivilen GPS*. Web-Seite, 30.10.2009. www.elektroniknet.de/kommunikation/sonstiges/artikel/1558/0/, Zugr.: 2014. WEKA Fachmedien GmbH, Haar, Deutschland.

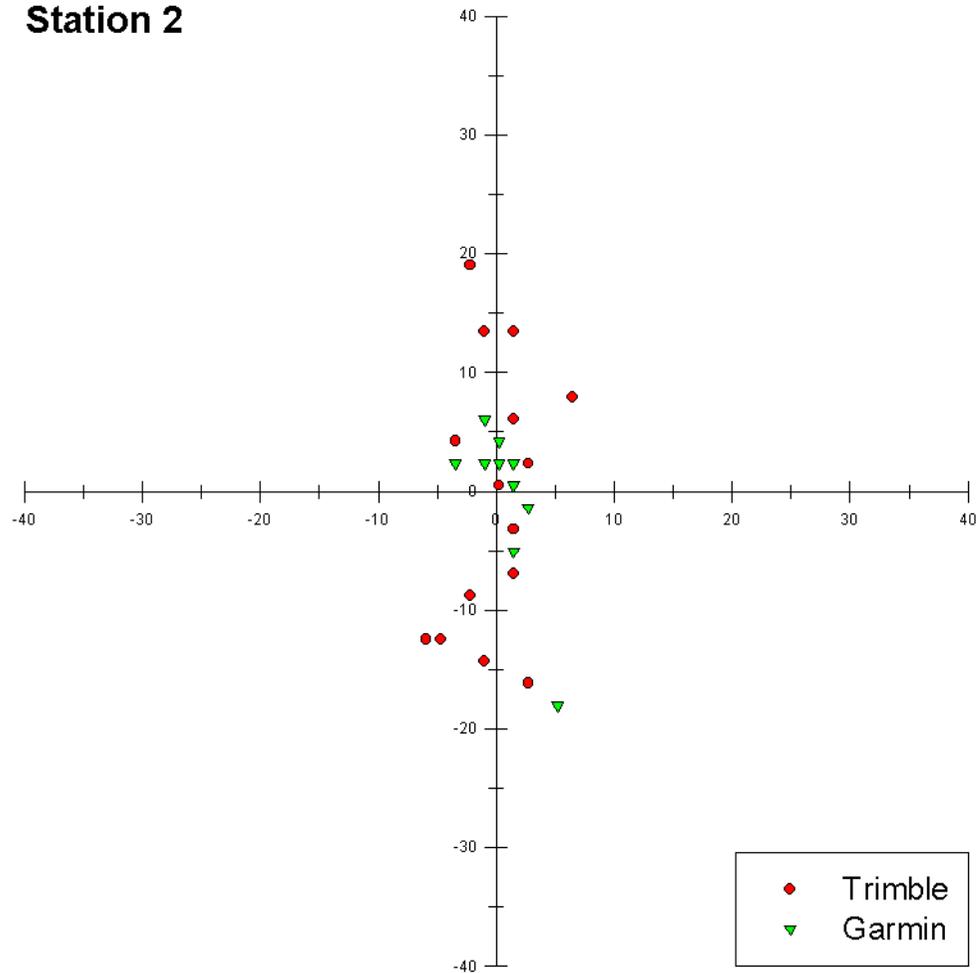
Station 1

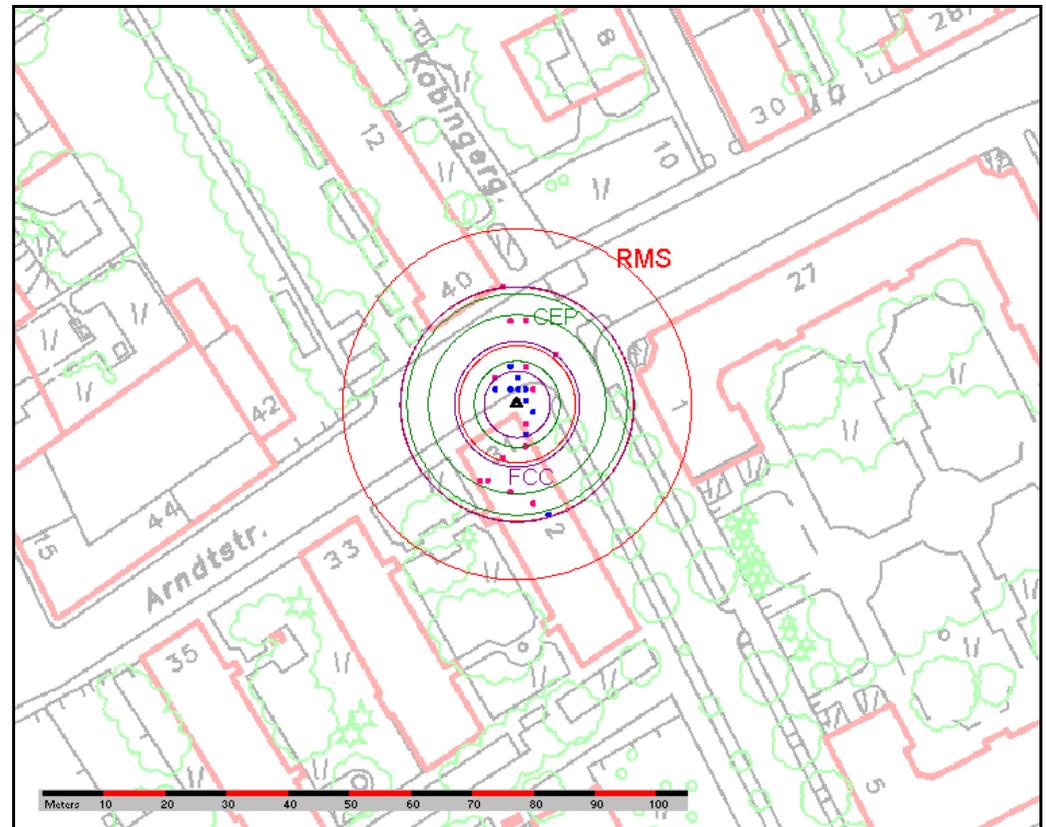
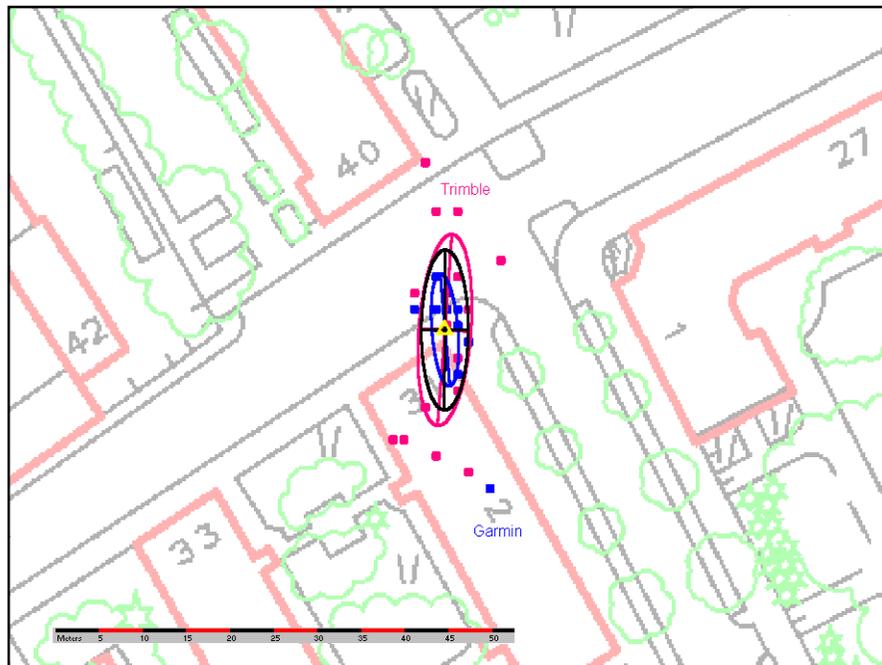




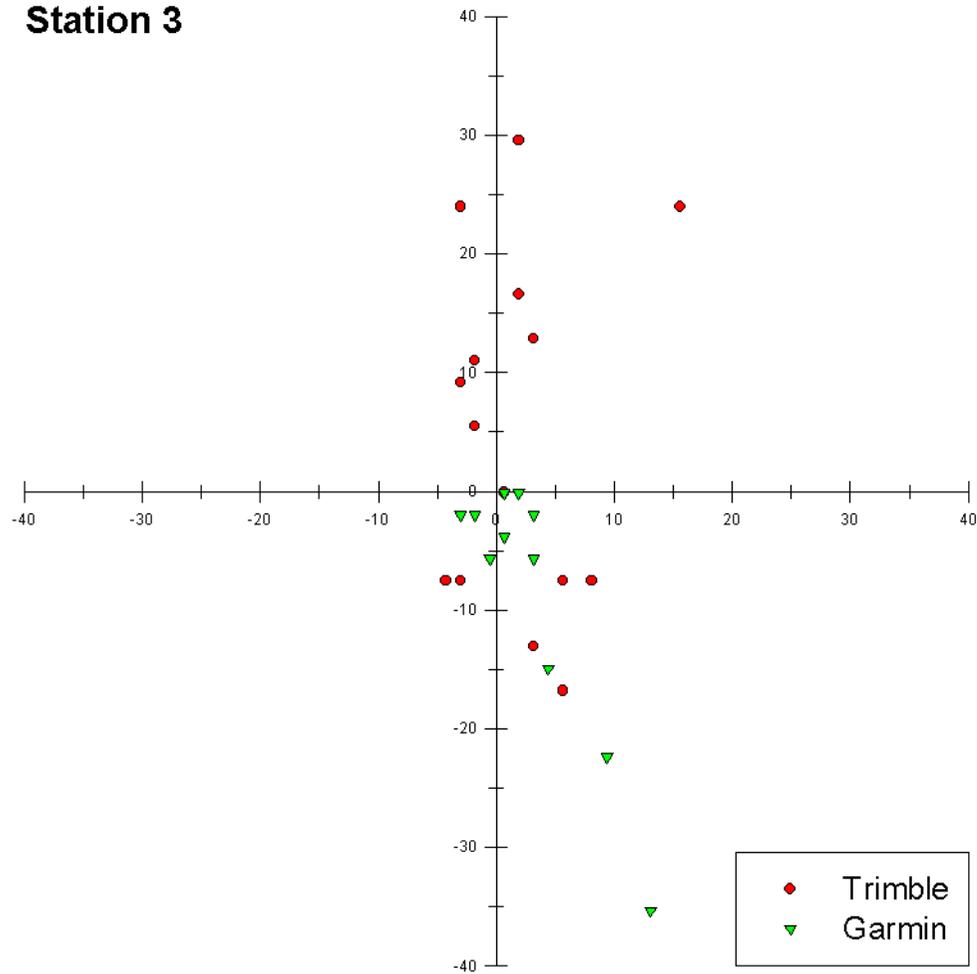
Die Streubilder der 10 Stationen mit maßstäblichem Koordinatensystem wurden mit der Software „SigmaPlot“ (Studentenversion des ZID der TU Wien) erstellt. Die Visualisierungen der Fehlermaße (unterschiedliche Ellipsen und Kreise) erfolgten auf der georeferenzierten Rasterkarte MA41-MZK („Mehrzweckkarte“), die auszugsweise von der Stadtvermessung Wien zur Verfügung gestellt wurde. Das kostenlose GIS-Tool „ArcExplorer“ der Fa. ESRI ermöglichte ein maßstäbliches Zusammenspielen dieser Vektor- und Rasterdaten sowie eine einfache Beschriftung. Die digitalen Fotos konnten dankenswerterweise mit einer Kamera des Studienkollegen Heisler aufgenommen werden.

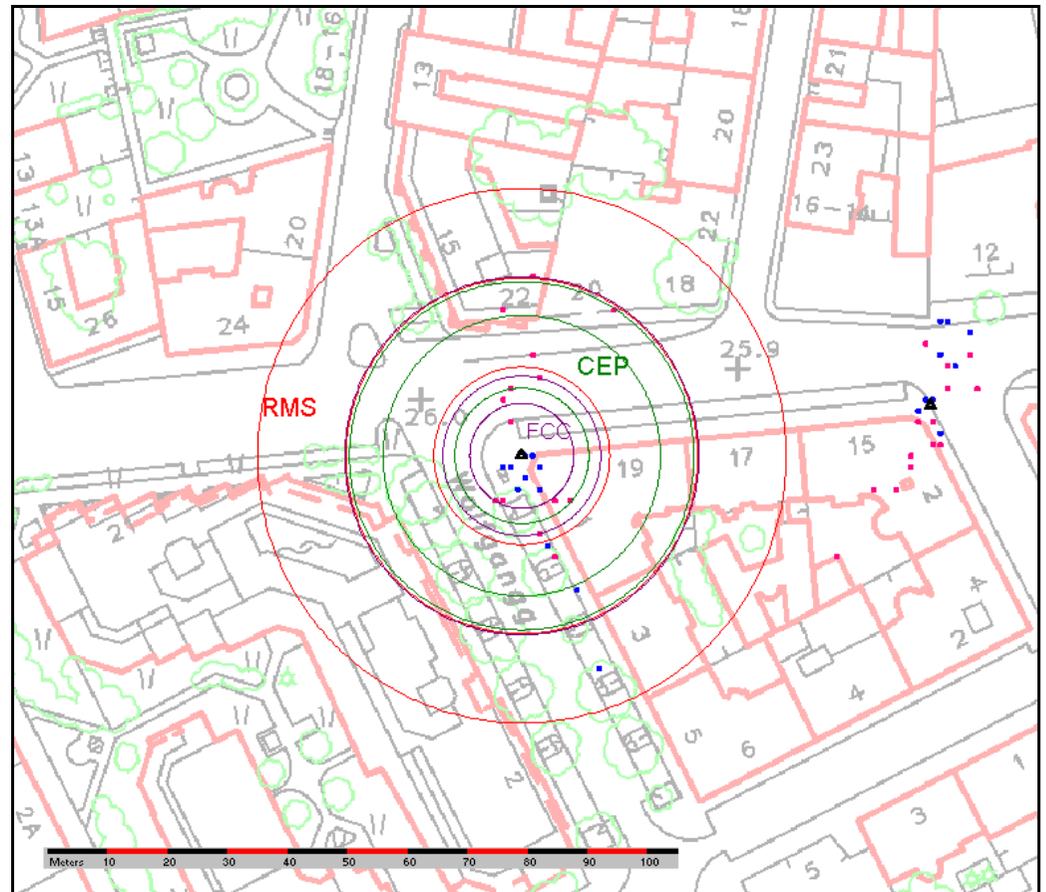
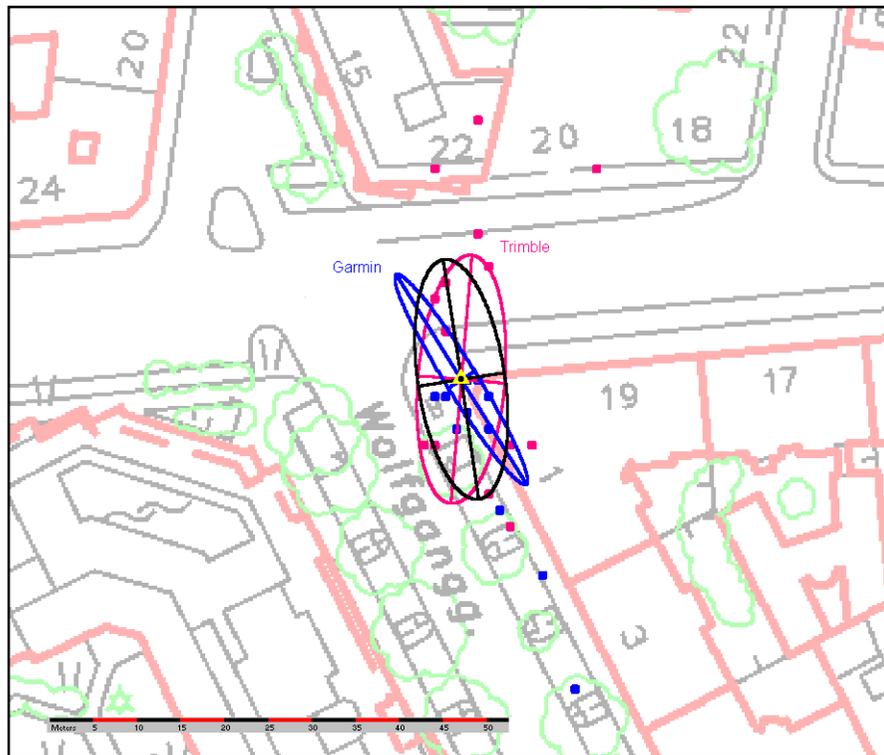
Station 2



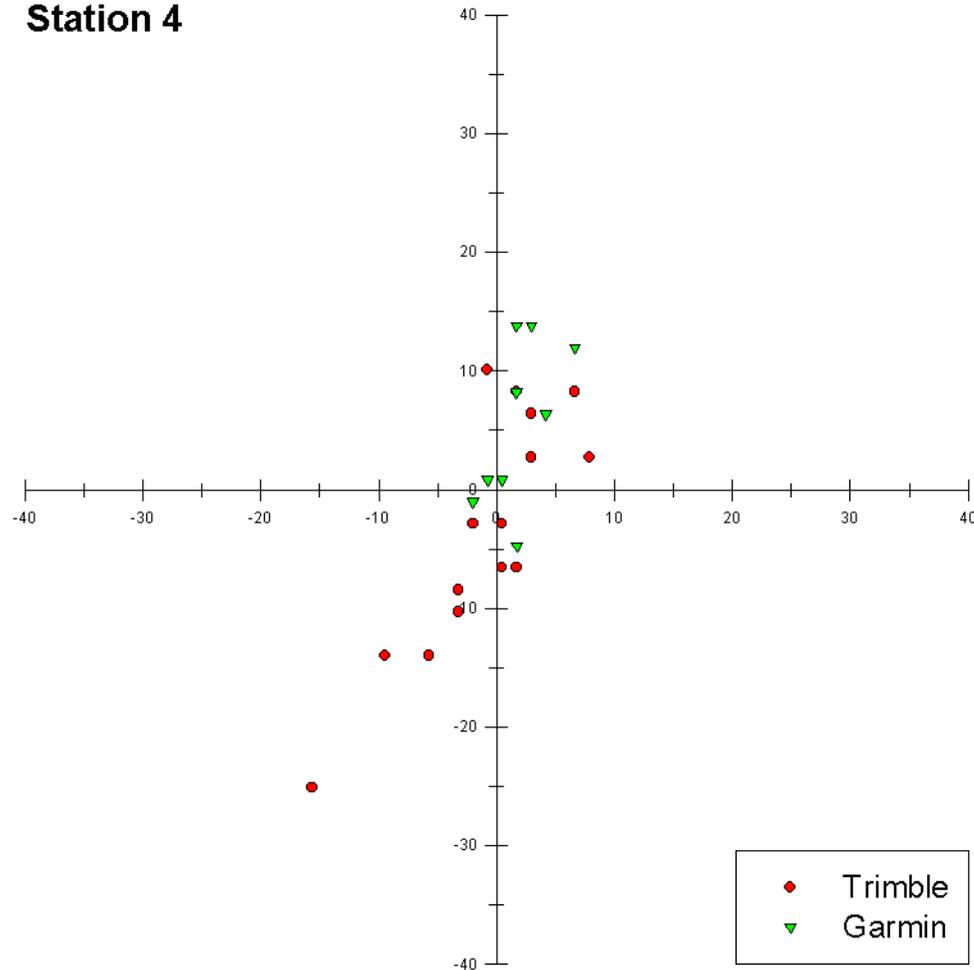


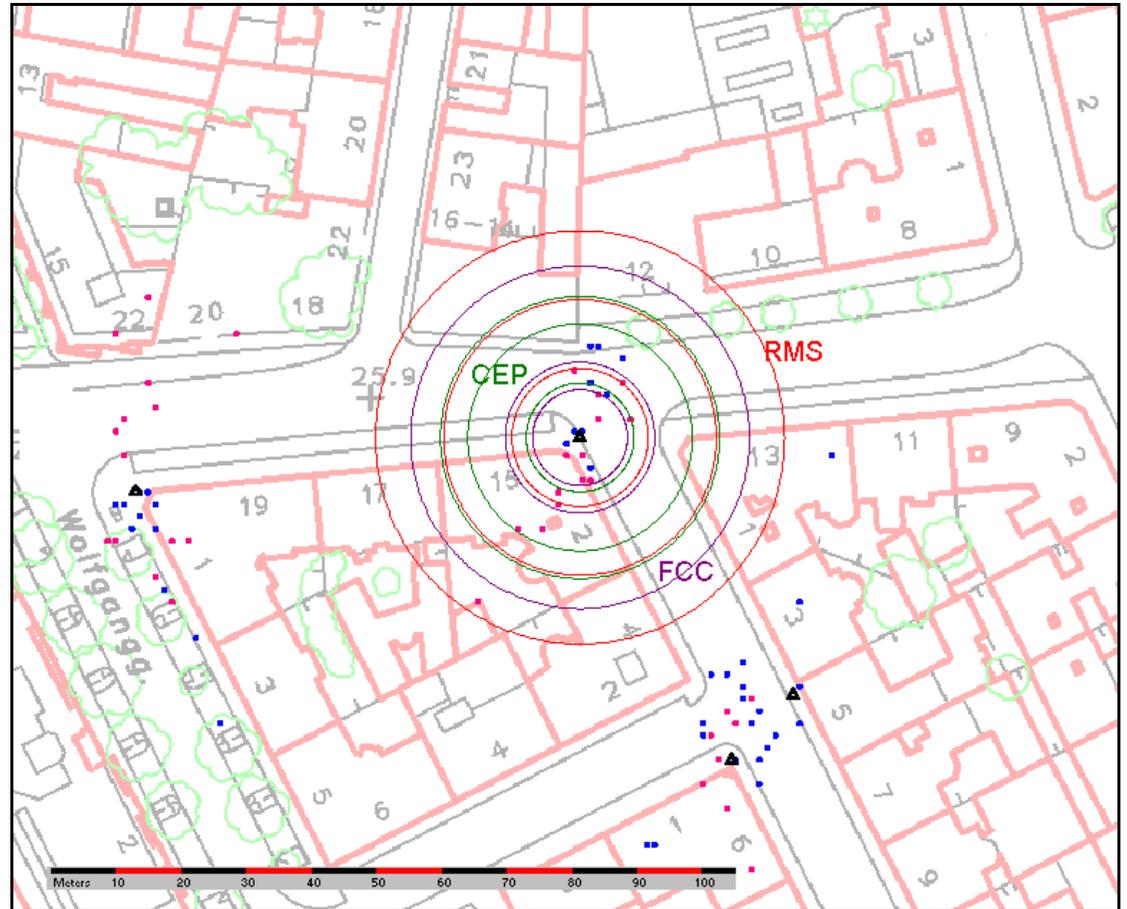
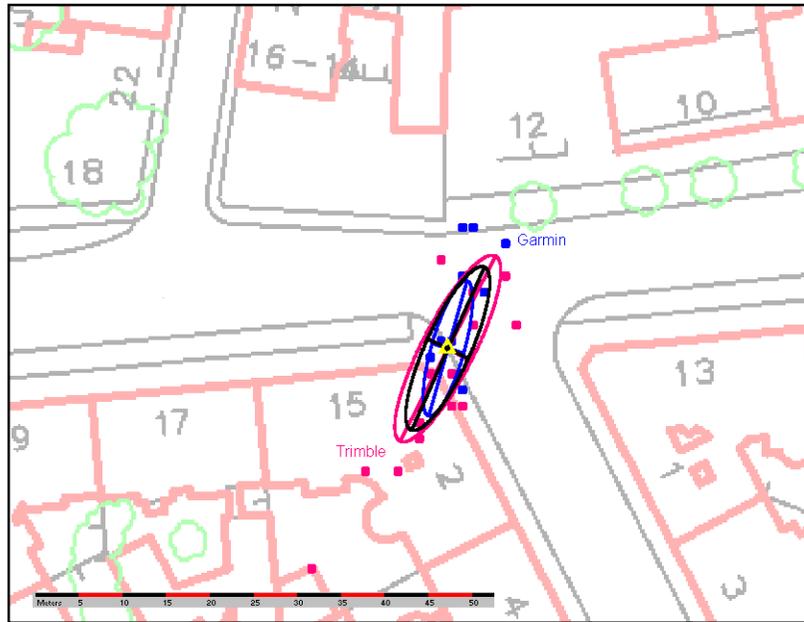
Station 3



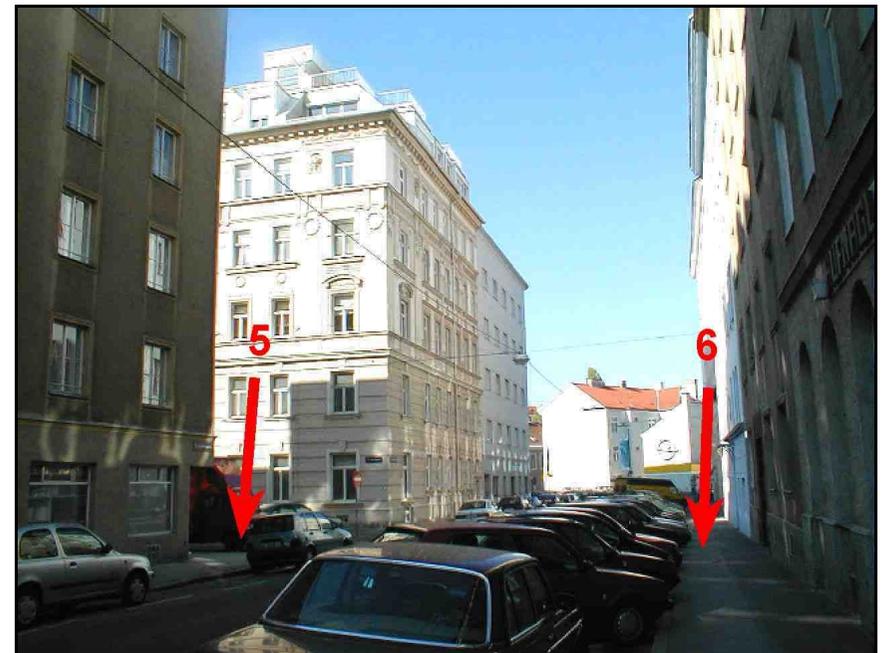
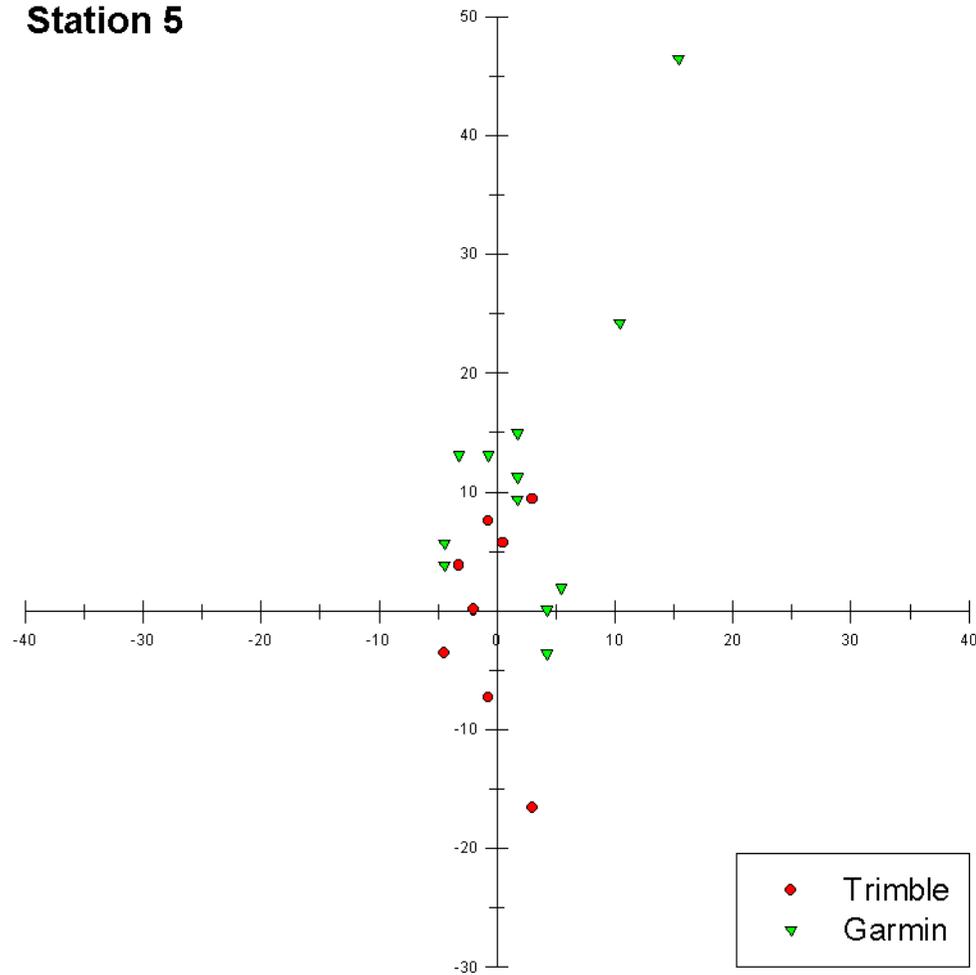


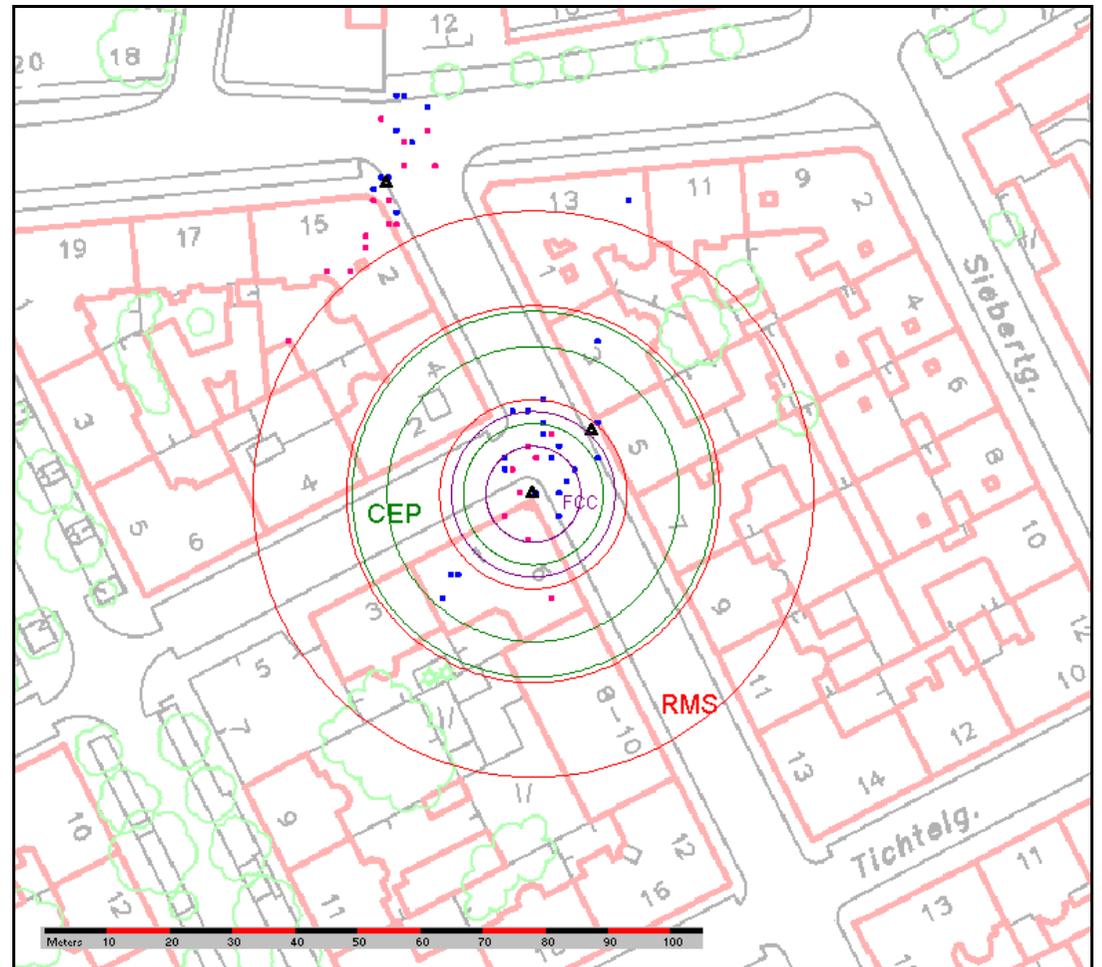
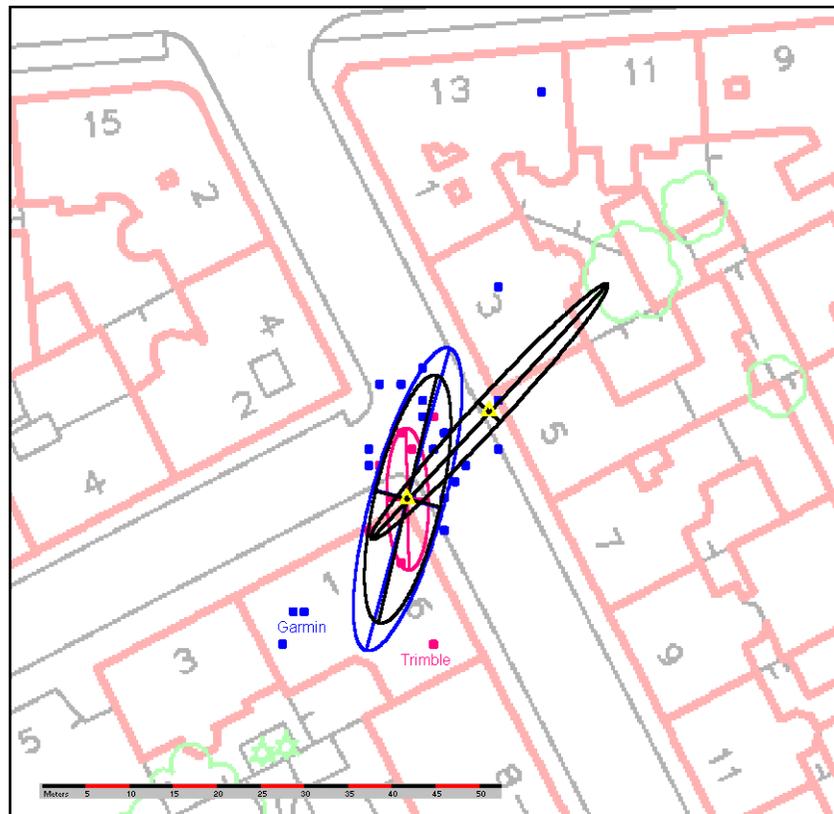
Station 4



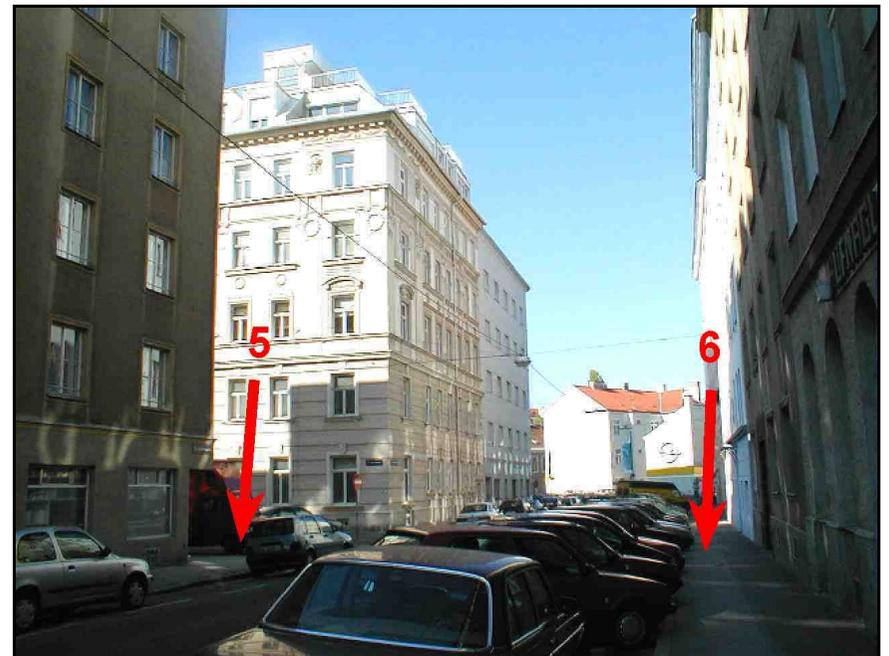
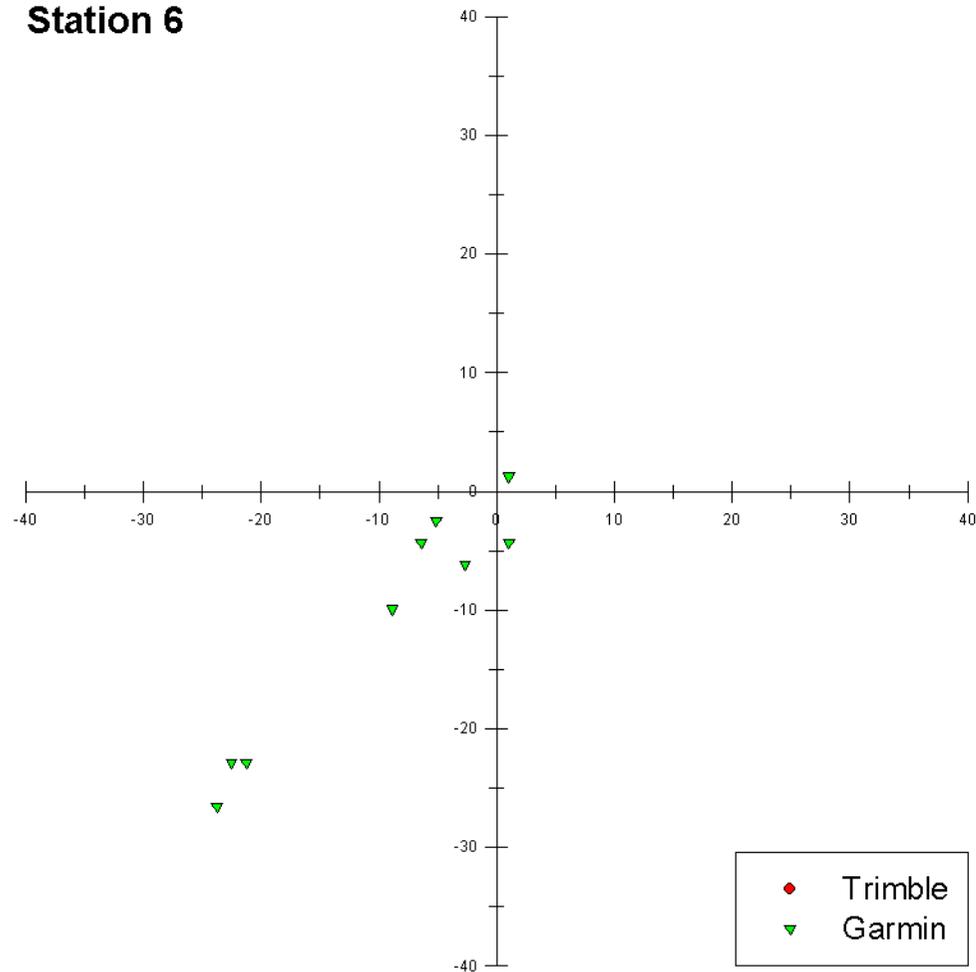


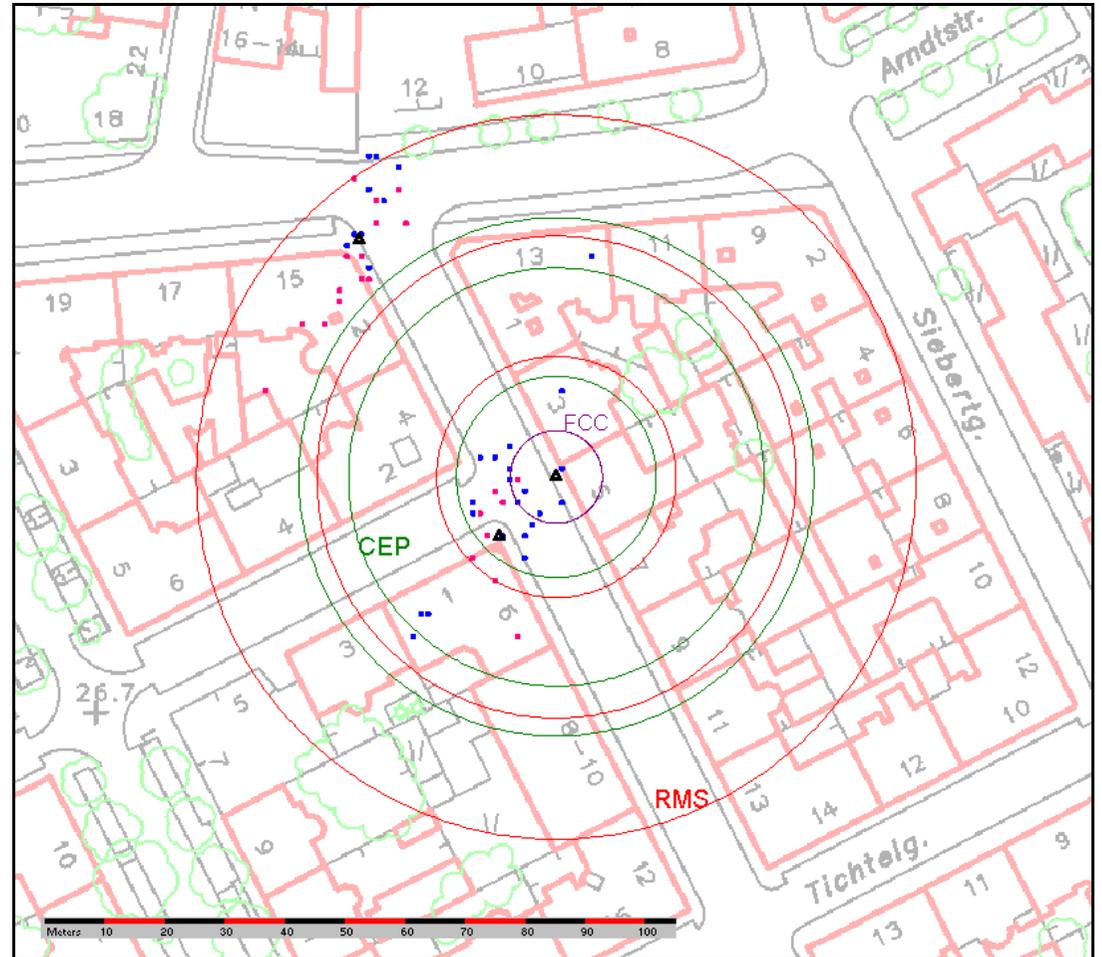
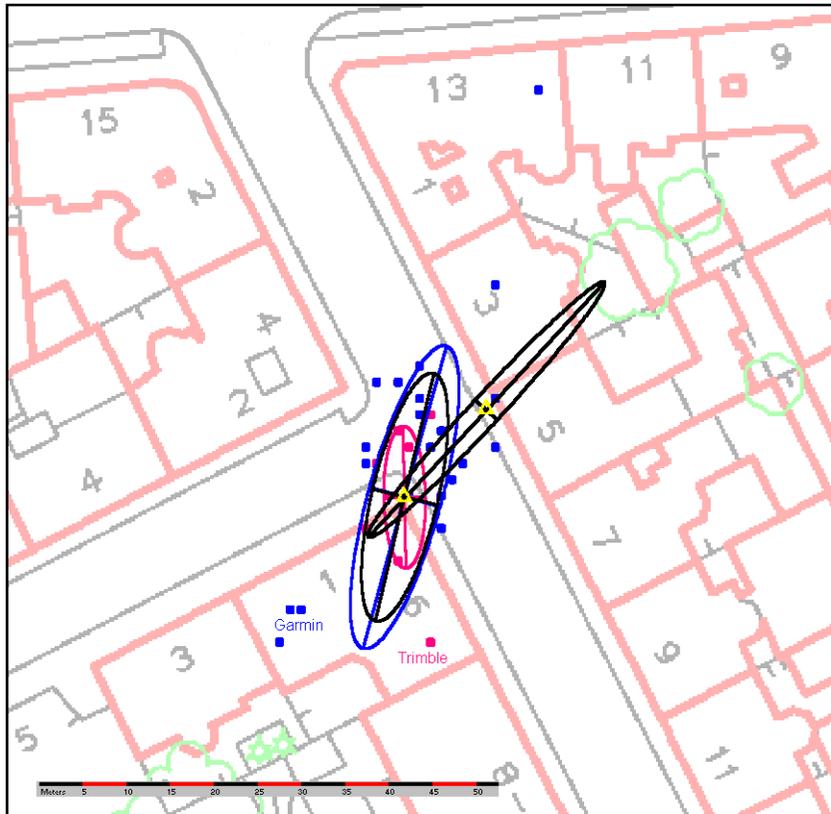
Station 5



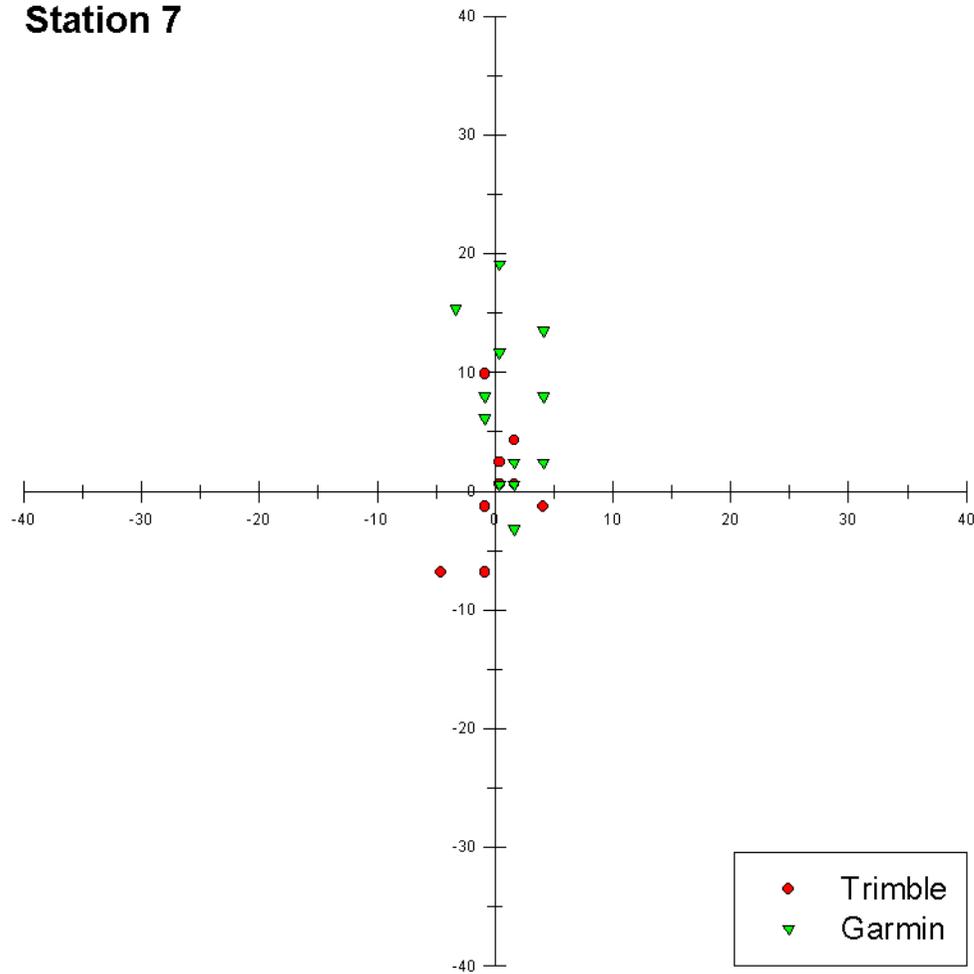


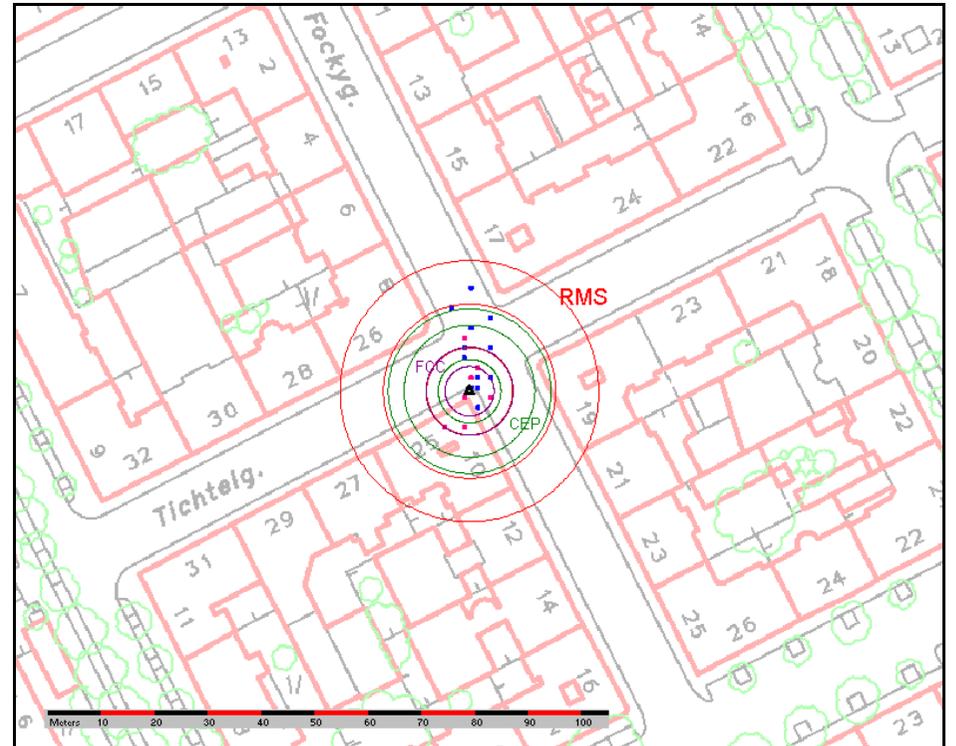
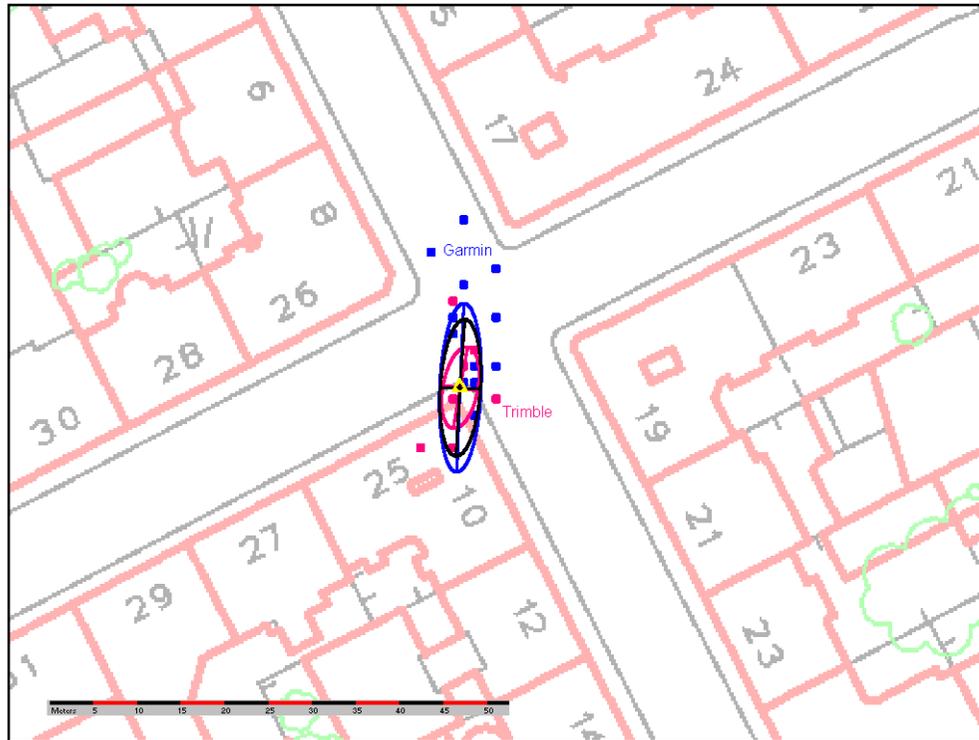
Station 6



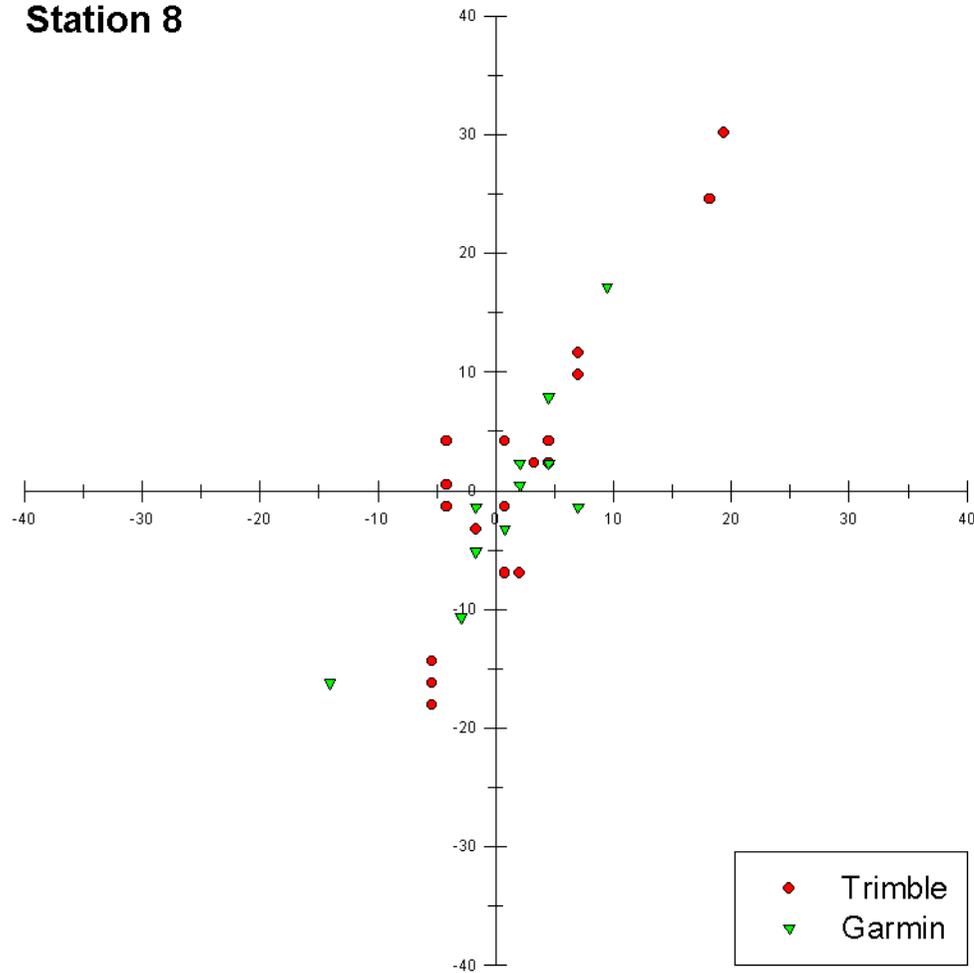


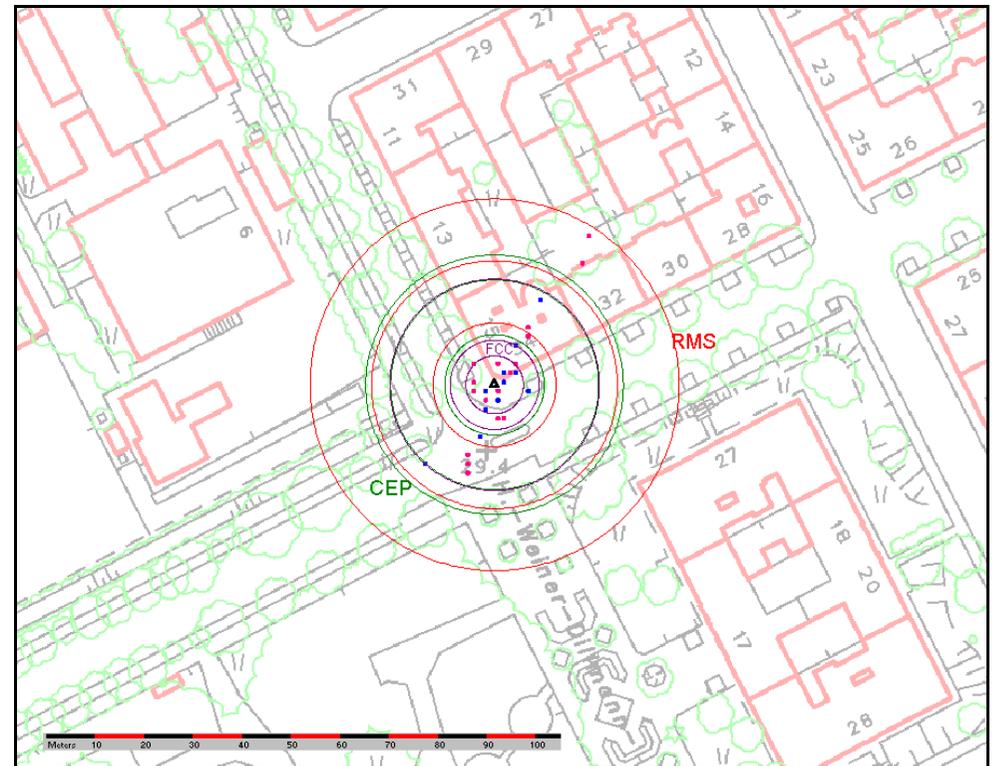
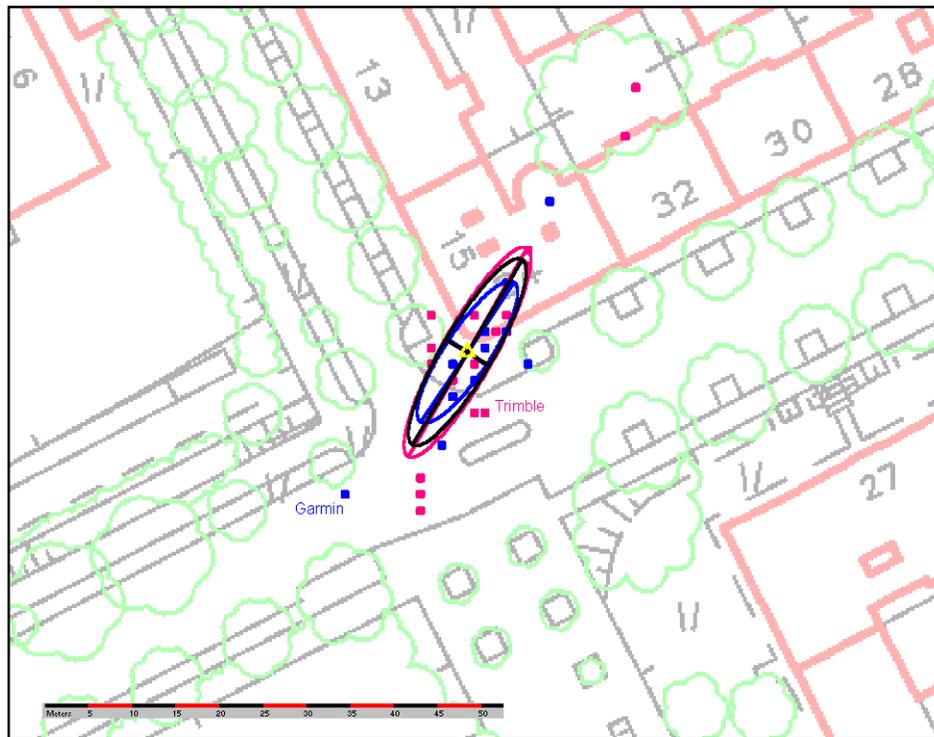
Station 7



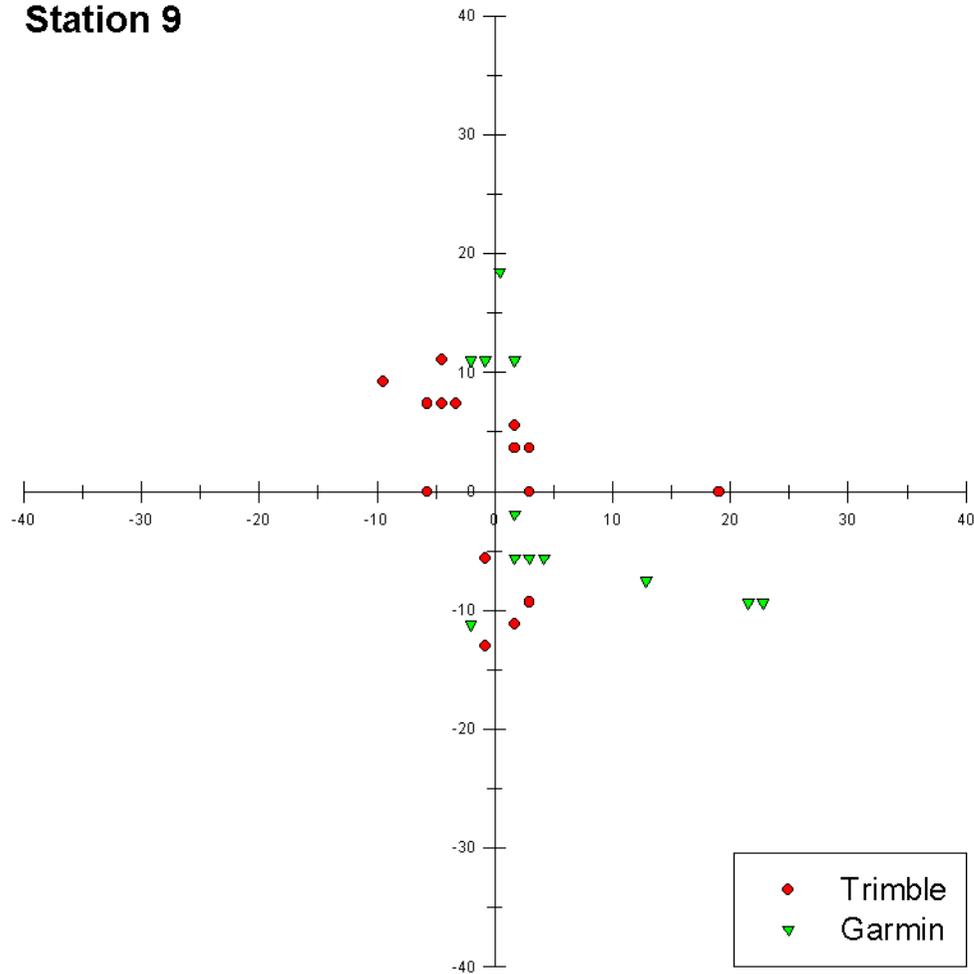


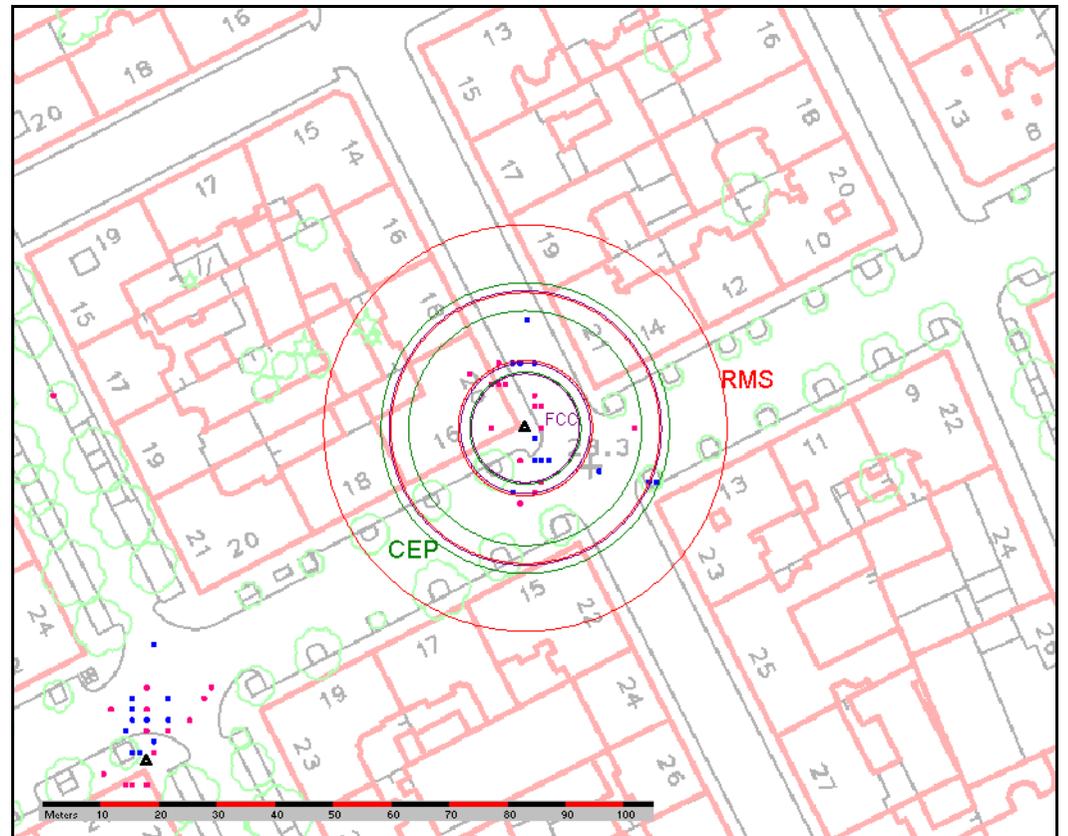
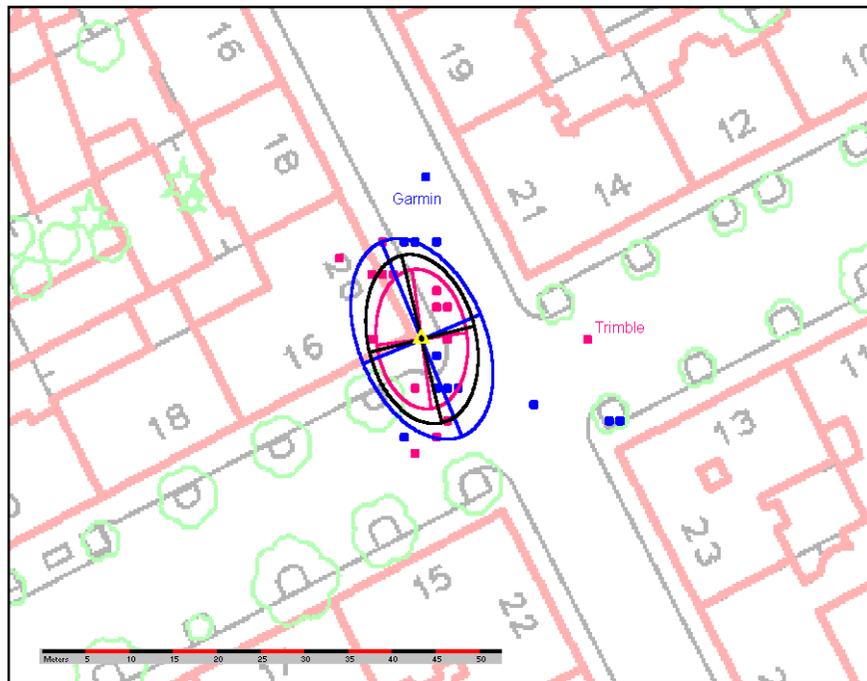
Station 8



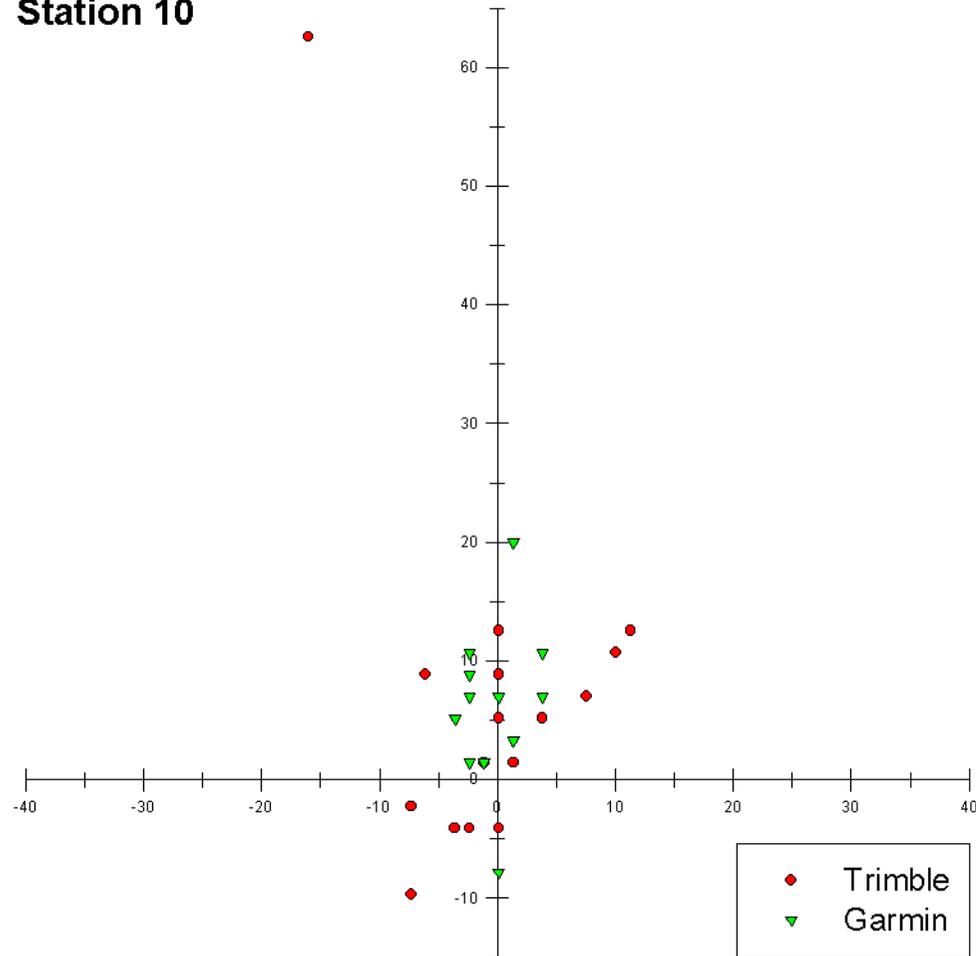


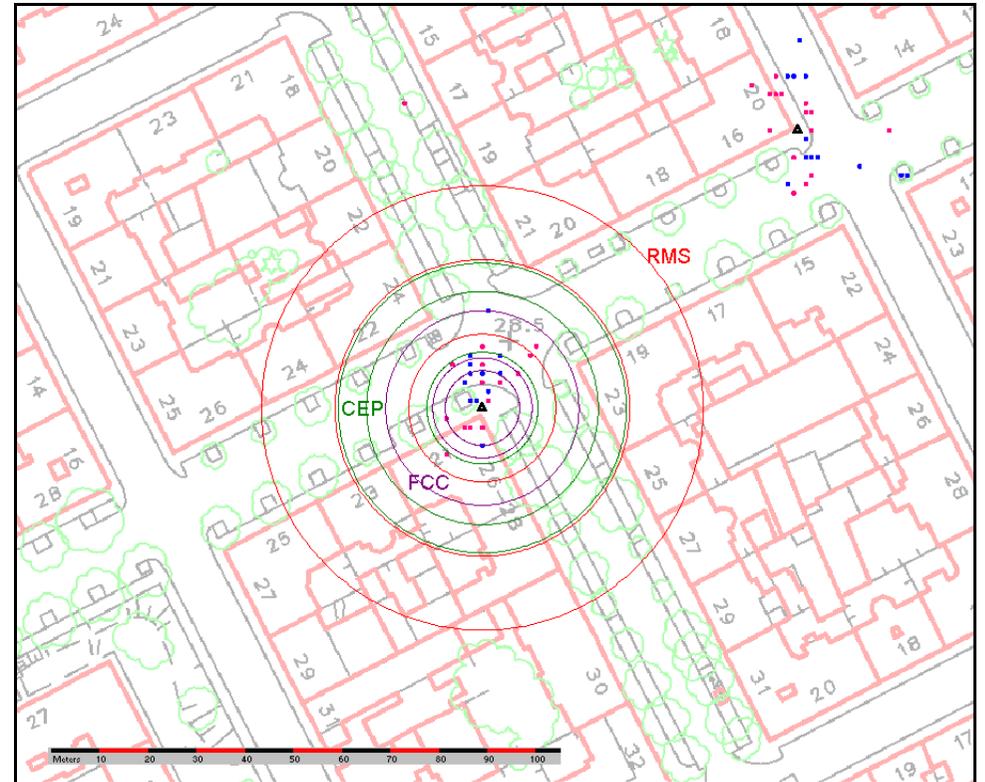
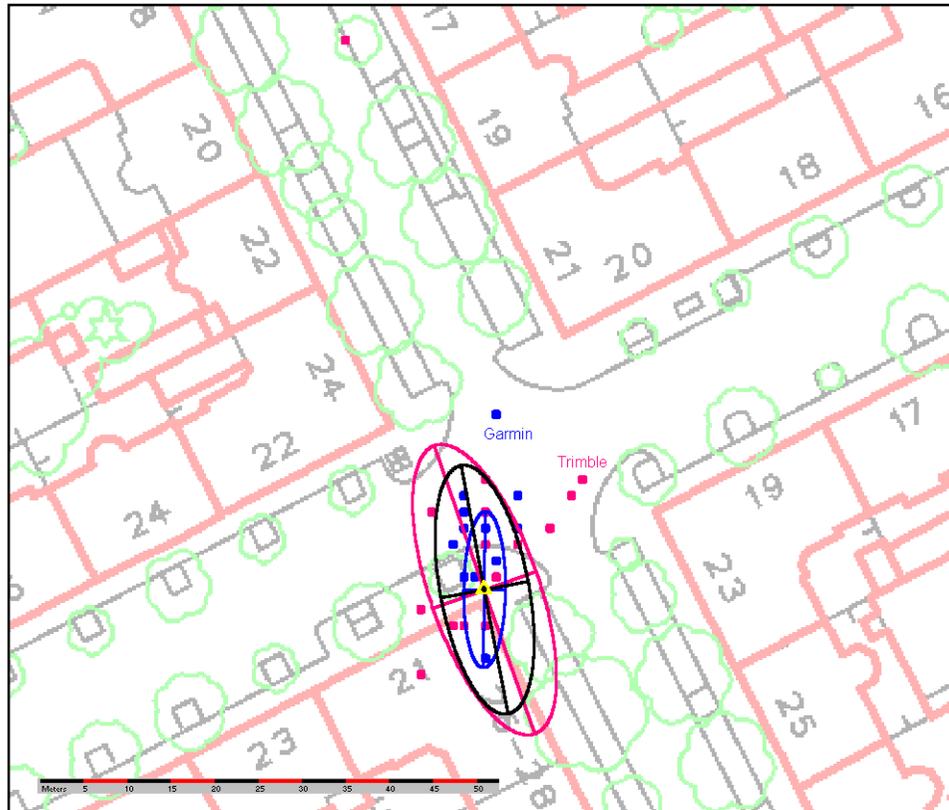
Station 9



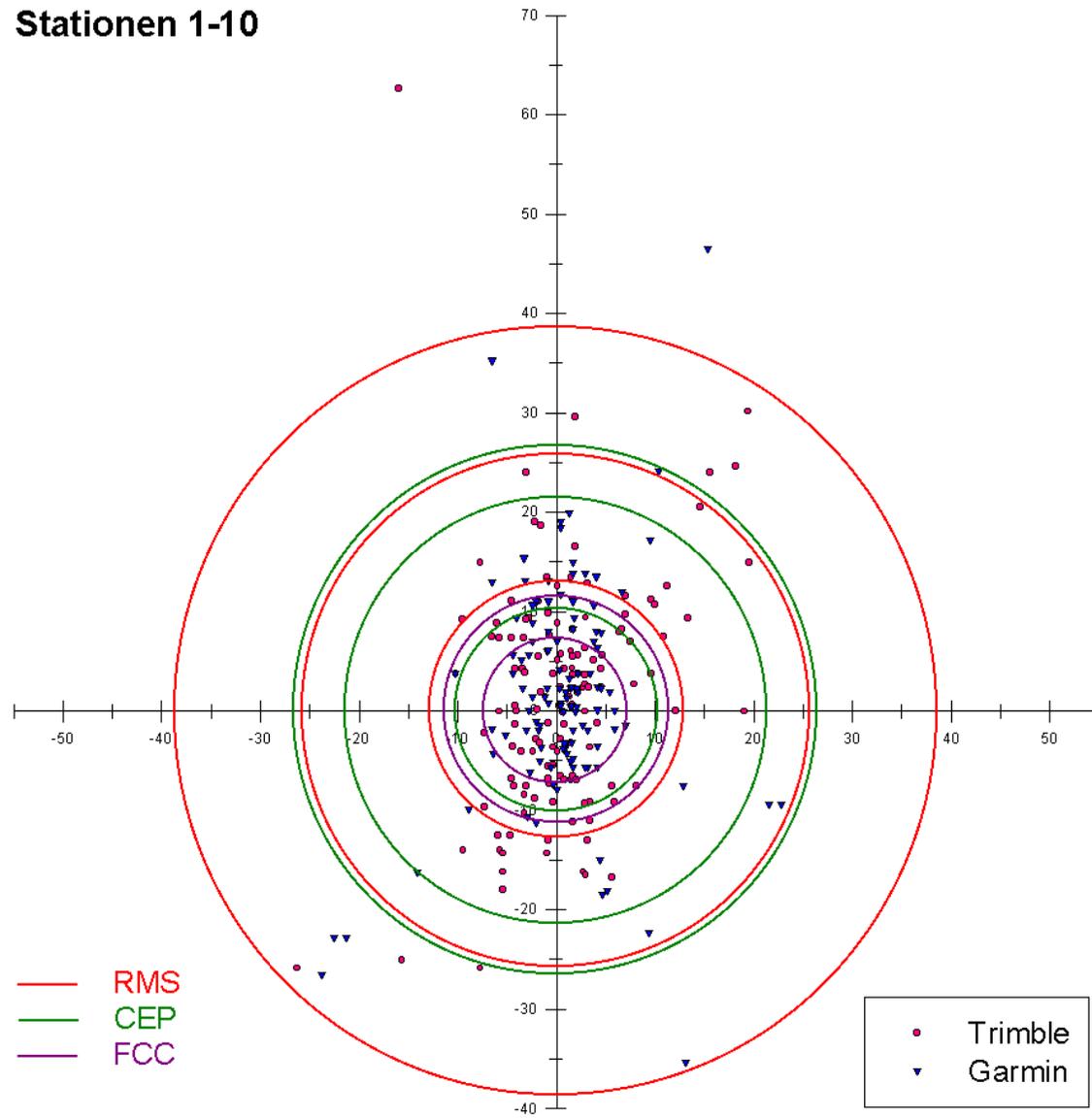


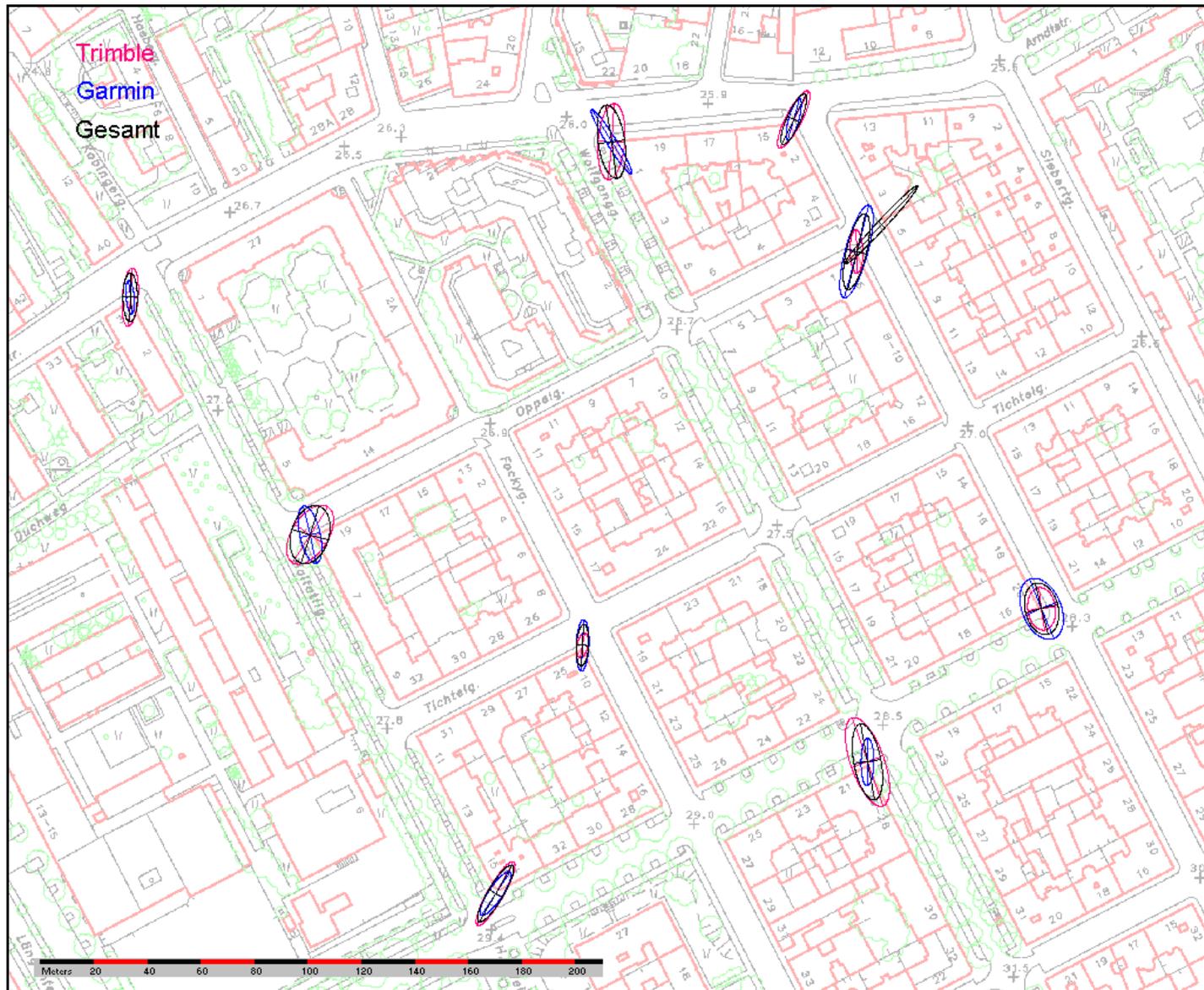
Station 10





Stationen 1-10





Anhang 2a

Messdaten

WPT-Nr.	N	E	H (mittel)	Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	DOP gemittelt	EPE	EPE gemittelt
Trimble															
1	48,11014	16,20369	200	1	1	13.08.2000	11:13	200		3	2D	3,8 - 3,5	3,7		
2	48,11017	16,20365	200	1	2	13.08.2000	11:14	200		3	2D	3,8 - 3,5	3,7		
3	48,11019	16,20370	200	1	3	13.08.2000	11:15	200		3	2D	3,8 - 3,5	3,7		
4	48,11064	16,20316	200	2	4	13.08.2000	11:20	200		3	2D	3,1 - 2,9	3,0		
5	48,11067	16,20315	200	2	5	13.08.2000	11:22	200		3	2D	3,1 - 2,9	3,0		
6	48,11064	16,20318	200	2	6	13.08.2000	11:23	200		3	2D	3,1 - 2,9	3,0		
7	48,11095	16,20465	200	3	7	13.08.2000	11:33	200		3	2D	2,4 - 2,5	2,4		
8	48,11095	16,20465	200	3	8	13.08.2000	11:34	200		3	2D	2,4 - 2,5	2,4		
9	48,11104	16,20464	200	3	9	13.08.2000	11:36	200		3	2D	2,4 - 2,5	2,4		
10	48,11085	16,20510	200	4	10	13.08.2000	11:45	200		3	2D	5,5 - 5,7	5,6		
11	48,11096	16,20520	200	4	11	13.08.2000	11:47	200		3	2D	6,2 - 6,8	6,5		
12	48,11094	16,20520	200	4	12	13.08.2000	11:47	200		3	2D	7,0 - 7,5	7,3		
13	48,11009	16,20368	195	1	13	13.08.2000	12:13	200	180 - 210	4	3D	5,3	5,3		
14	48,11017	16,20387	195	1	14	13.08.2000	12:15	200	180 - 210	4	3D	5,3	5,3		
15	48,11013	16,20380	195	1	15	13.08.2000	12:16	200	180 - 210	4	3D	5,3	5,3		
16	48,10939	16,20424	210	8	16	13.08.2000	12:22	200	210	4	3D	5,1	5,1		
17	48,10938	16,20430	200	8	17	13.08.2000	12:45	200		3	2D	2,6 - 2,5	2,5		
18	48,10939	16,20431	210	8	18	13.08.2000	12:46	200	210	4	3D	5,9 - 5,7	5,8		
19	48,10938	16,20430	210	8	19	13.08.2000	12:47	200	210	4	3D	5,5 - 5,4	5,5		
20	48,10936	16,20428	210	8	20	13.08.2000	12:48	200	210	4	3D	5,3 - 5,1	5,2		
21	48,10939	16,20428	210	8	21	13.08.2000	12:50	200	210	4	3D	5,0 - 4,9	4,9		
22	48,10998	16,20589	200	9	22	13.08.2000	12:59	200		3	2D	6,2 - 7,4	6,8		
23	48,10999	16,20585	200	9	23	13.08.2000	13:00	200		3	2D	6,2 - 7,4	6,8		
24	48,10996	16,20595	200	9	24	13.08.2000	13:02	200		3	2D	6,2 - 7,4	6,8		
25	48,10997	16,20527	200	10	25	13.08.2000	13:07	200		3	2D	8,9 - 8,0	8,5		
26	48,10964	16,20539	200	10	26	13.08.2000	13:08	200		3	2D	8,9 - 8,0	8,5		
27	48,10970	16,20540	200	10	27	13.08.2000	13:09	200		3	2D	8,9 - 8,0	8,5		
28	Old Fix														
29	48,11004	16,20376	184	1	28	14.08.2000	11:28	184		3	2D	3,7 - 4,1	3,9		
30	48,11007	16,20374	184	1	29	14.08.2000	11:29	184		3	2D	3,7 - 4,1	3,9		
31	48,10995	16,20365	184	1	30	14.08.2000	11:30	184		3	2D	3,7 - 4,1	3,9		
32	48,11084	16,20469	184	3	31	14.08.2000	11:41	184		3	2D	2,8 - 2,9	2,8		
33	48,11084	16,20467	184	3	32	14.08.2000	11:42	184		3	2D	2,8 - 2,9	2,8		
34	48,11081	16,20465	184	3	33	14.08.2000	11:43	184		3	2D	2,8 - 2,9	2,8		
35	48,11079	16,20505	184	4	34	14.08.2000	11:47	184		3	2D	10,0 - 14,2	12,1		
36	48,11091	16,20518	184	4	35	14.08.2000	11:48	184		3	2D	10,0 - 14,2	12,1		
37	Old Fix														
38	48,11007	16,20371	210	1	36	14.08.2000	12:06	184	180 - 240	4	3D	5,3	5,3		
39	48,11020	16,20383	210	1	37	14.08.2000	12:07	184	180 - 240	4	3D	5,3	5,3		
40	48,11011	16,20379	210	1	38	14.08.2000	12:09	184	180 - 240	4	3D	5,3	5,3		
41	48,11015	16,20379	210	1	39	14.08.2000	12:10	184	180 - 240	4	3D	5,3	5,3		
42	48,10995	16,20350	210	1	40	14.08.2000	12:11	184	180 - 240	4	3D	5,3	5,3		
43	48,11012	16,20375	210	1	41	14.08.2000	12:12	184	180 - 240	4	3D	5,3	5,3		
44	48,10936	16,20424	210	8	42	14.08.2000	12:18	184	180 - 210	4	3D	5,1 - 5,0	5,1		
45	48,10938	16,20431	210	8	43	14.08.2000	12:19	184	180 - 210	4	3D	5,1 - 5,0	5,1		
46	48,10937	16,20424	210	8	44	14.08.2000	12:20	184	180 - 210	4	3D	5,1 - 5,0	5,1		
47	48,10935	16,20426	210	8	45	14.08.2000	12:21	184	180 - 210	4	3D	5,1 - 5,0	5,1		
48	48,10994	16,20595	184	9	46	14.08.2000	12:27	184		3	2D	2,2	2,2		
49	48,10998	16,20588	180	9	47	14.08.2000	12:28	184	180	4	3D	6,8 - 6,9	6,8		
50	48,10997	16,20594	180	9	48	14.08.2000	12:29	184	180	4	3D	7	7,0		
51	48,10996	16,20594	150	9	49	14.08.2000	12:29	184	150	4	3D	7,0 - 7,1	7,1		
52	48,11000	16,20589	180	9	50	14.08.2000	12:31	184	180	4	3D	7,2 - 7,3	7,2		

Anhang 2a

Messdaten

WPT-Nr.	N	E	H (mittel)	Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	DOP gemittelt	EPE	EPE gemittelt
53	48,10970	16,20549	184	10	51	14.08.2000	12:34	184		3	2D	3,1	3,1		
54	48,10964	16,20541	210	10	52	14.08.2000	12:36	184	210	4	3D	3	3,0		
55	48,10969	16,20548	180	10	53	14.08.2000	12:36	184	180	4	3D	3	3,0		
56	48,10967	16,20546	180	10	54	14.08.2000	12:38	184	180	4	3D	3	3,0		
57	48,10716	16,20562	184	(11)	55	14.08.2000	12:50	184							
58	48,11052	16,20315	210	2	56	14.08.2000	20:23	184	210	4	3D	5,6 - 5,2	5,4		
59	48,11048	16,20319	210	2	57	14.08.2000	20:25	184	210	4	3D	5,6 - 5,2	5,4		
60	48,11060	16,20318	210	2	58	14.08.2000	20:26	184	210	4	3D	5,6 - 5,2	5,4		
61	48,11088	16,20463	210	3	59	14.08.2000	20:30	184	210	4	3D	6,6 - 7,1	6,9		
62	48,11079	16,20467	210	3	60	14.08.2000	20:31	184	210	4	3D	6,6 - 7,1	6,9		
63	48,11094	16,20461	210	3	61	14.08.2000	20:32	184	210	4	3D	6,6 - 7,1	6,9		
64	48,11087	16,20515	180	4	62	14.08.2000	20:35	184	180	5	3D	3,2	3,2		
65	48,11094	16,20524	180	4	63	14.08.2000	20:35	184	180	5	3D	3,2	3,2		
66	48,11089	16,20518	180	4	64	14.08.2000	20:36	184	180	5	3D	3,2	3,2		
67	48,11091	16,20516	180	4	65	14.08.2000	20:37	184	180	5	3D	3,2	3,2		
68	48,11066	16,20535	184	5	66	14.08.2000	20:40	184		3	2D	2,6	2,6		
69	48,11069	16,20537	184	5	67	14.08.2000	20:41	184		3	2D	2,6	2,6		
70	48,11068	16,20534	184	5	68	14.08.2000	20:42	184		3	2D	2,6	2,6		
71	48,10986	16,20457	184	7	69	14.08.2000	20:50	184		3	2D	2,5	2,5		
72	48,10987	16,20454	180	7	70	14.08.2000	20:50	184	180	4	3D	3,9 - 4,0	3,9		
73	48,10988	16,20454	180	7	71	14.08.2000	20:51	184	180	4	3D	3,9 - 4,0	3,9		
74	48,10987	16,20454	180	7	72	14.08.2000	20:52	184	180	4	3D	3,9 - 4,0	3,9		
75	48,11004	16,20374	184	1	73	14.08.2000	20:55	184		(4)	2D	2,5 - 2,4	2,5		
76	48,11003	16,20374	184	1	74	14.08.2000	20:57	184		(4)	2D	2,5 - 2,4	2,5		
77	48,11004	16,20374	184	1	75	14.08.2000	20:59	184		(4)	2D	2,5 - 2,4	2,5		
78	48,10928	16,20423	184	8	76	14.08.2000	21:03	184		(4)	2D	4,6 - 4,4	4,5		
79	48,10927	16,20423	184	8	77	14.08.2000	21:04	184		(4)	2D	4,6 - 4,4	4,5		
80	48,10929	16,20423	184	8	78	14.08.2000	21:05	184		(4)	2D	4,6 - 4,4	4,5		
81	48,10994	16,20588	184	9	79	14.08.2000	21:10	184		3	2D	2,7	2,7		
82	48,10991	16,20592	184	9	80	14.08.2000	21:11	184		3	2D	2,7	2,7		
83	48,10988	16,20594	184	9	81	14.08.2000	21:12	184		3	2D	2,7	2,7		
84	48,10961	16,20537	184	10	82	14.08.2000	21:16	184		3	2D	2,5 - 2,6	2,5		
85	48,10958	16,20534	184	10	83	14.08.2000	21:17	184		3	2D	2,5 - 2,6	2,5		
86	48,10962	16,20534	184	10	84	14.08.2000	21:19	184		3	2D	2,5 - 2,6	2,5		
87	48,11010	16,20373	180	1	85	15.08.2000	07:00	184	180	4	3D	7,2 - 7,5	7,4		
88	48,11009	16,20381	180	1	86	15.08.2000	07:02	184	180	5	3D	3,8 - 3,7	3,7		
89	48,11011	16,20373	184	1	87	15.08.2000	07:04	184		(5)	2D	3,7	3,7		
90	48,11057	16,20317	184	2	88	15.08.2000	07:08	184		3	2D	7,8 - 7,9	7,9		
91	48,11053	16,20318	184	2	89	15.08.2000	07:10	184		(4)	2D	4,8 - 4,4	4,6		
92	48,11055	16,20318	184	2	90	15.08.2000	07:11	184		(4)	2D	4,8 - 4,4	4,6		
93	48,11097	16,20464	210	3	91	15.08.2000	07:18	184	210	5	3D	7,3	7,3		
94	48,11101	16,20475	210	3	92	15.08.2000	07:19	184	210	6	3D	5,8 - 6,0	5,9		
95	48,11088	16,20463	210	3	93	15.08.2000	07:20	184	210	5	3D	6,6 - 6,5	6,5		
96	48,11097	16,20519	184	4	94	15.08.2000	07:23	184		4	3D	6,8	6,8		
97	48,11098	16,20517	184	4	95	15.08.2000	07:25	184		5	3D	7,0 - 7,5	7,3		
98	48,11089	16,20519	184	4	96	15.08.2000	07:27	184		6	3D	5,3	5,3		
1	48,11050	16,20312	180	2	97	16.08.2000	20:18	184	180	4	3D	5,1 - 4,8	5,0		
2	48,11050	16,20313	180	2	98	16.08.2000	20:19	184	180	4	3D	5,1 - 4,8	5,0		
3	48,11049	16,20316	180	2	99	16.08.2000	20:20	184	180	4	3D	5,1 - 4,8	5,0		
4	48,11084	16,20459	210	3	100	16.08.2000	20:25	184	210	4	3D	7,3 - 7,5	7,4		
5	48,11084	16,20459	180	3	101	16.08.2000	20:26	184	180	5	3D	7,7 - 7,8	7,7		

Anhang 2a

Messdaten

WPT-Nr.	N	E	H (mittel)	Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	DOP gemittelt	EPE	EPE gemittelt
6	48,11084	16,20460	184	3	102	16.08.2000	20:28	184		(6)	2D	3,2 - 3,1	3,2		
7	48,11088	16,20515	180	4	103	16.08.2000	20:31	184	180	5	3D	3,2	3,2		
8	48,11097	16,20523	150	4	104	16.08.2000	20:33	184	150	5	3D	3,2	3,2		
9	48,11085	16,20513	150	4	105	16.08.2000	20:35	184	150	4	3D	5,4 - 5,5	5,4		
10	48,11057	16,20539	184	5	106	16.08.2000	20:37	184		3	2D	2,5	2,5		
11	48,11064	16,20533	184	5	107	16.08.2000	20:38	184		3	2D	2,5	2,5		
12	48,11062	16,20536	184	5	108	16.08.2000	20:39	184		3	2D	2,5	2,5		
13	48,11004	16,20371	184	1	109	16.08.2000	20:47	184		(4)	2D	2,5	2,5		
14	48,11006	16,20371	184	1	110	16.08.2000	20:48	184		(4)	2D	2,5	2,5		
15	48,11006	16,20371	184	1	111	16.08.2000	20:49	184		(4)	2D	2,5	2,5		
16	48,10983	16,20450	184	7	112	16.08.2000	20:53	184		3	2D	2,4	2,4		
17	48,10983	16,20453	184	7	113	16.08.2000	20:54	184		3	2D	2,4	2,4		
18	48,10986	16,20453	210	7	114	16.08.2000	20:56	184	210	4	3D	3,5 - 3,6	3,6		
19	48,10933	16,20429	184	8	115	16.08.2000	21:01	184		3	2D	4,1 - 4,0	4,0		
20	48,10933	16,20428	184	8	116	16.08.2000	21:02	184		3	2D	4,1 - 4,0	4,0		
21	48,10950	16,20442	184	8	117	16.08.2000	21:03	184		(4)	2D	3,9	3,9		
22	48,10987	16,20592	184	9	118	16.08.2000	21:09	184		3	2D	2,9 - 3,0	3,0		
23	48,10991	16,20592	184	9	119	16.08.2000	21:10	184		3	2D	2,9 - 3,0	3,0		
24	48,10989	16,20595	184	9	120	16.08.2000	21:11	184		3	2D	2,9 - 3,0	3,0		
25	48,10968	16,20540	180	10	121	16.08.2000	21:24	184	180	4	3D	4,6 - 4,5	4,6		
26	48,10968	16,20535	180	10	122	16.08.2000	21:26	184	180	4	3D	4,6 - 4,5	4,6		
27	48,10966	16,20540	184	10	123	16.08.2000	21:28	184		3	2D	3	3,0		
28	48,11014	16,20382	184	1	124	17.08.2000	07:30	184		(4)	2D	11,7	11,7		
29	48,11010	16,20370	184	1	125	17.08.2000	07:31	184		(5)	2D	2,8	2,8		
30	48,11011	16,20371	184	1	126	17.08.2000	07:33	184		(5)	2D	2,7	2,7		
31	48,11061	16,20322	184	2	127	17.08.2000	07:36	184		(4)	2D	3,3	3,3		
32	48,11058	16,20319	180	2	128	17.08.2000	07:37	184	180	5	3D	3,9 - 4,0	3,9		
33	48,11059	16,20314	180	2	129	17.08.2000	07:38	184	180	5	3D	3,9 - 4,0	3,9		
34	48,11101	16,20460	210	3	130	17.08.2000	07:43	184	210	4	3D	6,3 - 6,5	6,4		
35	48,11091	16,20461	180	3	131	17.08.2000	07:44	184	180	4	3D	6,3 - 6,6	6,4		
36	48,11093	16,20460	180	3	132	17.08.2000	07:45	184	180	5	3D	4,6 - 4,5	4,6		
37	48,11071	16,20539	184	5	133	17.08.2000	07:54	184		3	2D	7,6 - 7,5	7,5		
38	48,11070	16,20536	184	5	134	17.08.2000	07:55	184		3	2D	7,6 - 7,5	7,5		
39	48,11070	16,20536	184	5	135	17.08.2000	07:56	184		3	2D	7,6 - 7,5	7,5		
40	48,10987	16,20455	184	7	136	17.08.2000	08:07	184		(4)	2D	8,6	8,6		
41	48,10989	16,20455	180	7	137	17.08.2000	08:08	184	180	5	3D	5,7 - 5,6	5,7		
42	48,10992	16,20453	180	7	138	17.08.2000	08:10	184	180	5	3D	5,7 - 5,6	5,7		
43	48,11012	16,20373	210	1	139	17.08.2000	08:13	184	210	4	3D	5,4 - 5,3	5,3		
44	48,11013	16,20366	210	1	140	17.08.2000	08:14	184	210	5	3D	3,7	3,7		
45	48,11011	16,20363	210	1	141	17.08.2000	08:16	184	210	5	3D	3,7	3,7		
46	48,10953	16,20443	184	8	142	17.08.2000	08:20	184		3	2D	6,0 - 6,1	6,1		
47	48,10943	16,20433	210	8	143	17.08.2000	08:21	184	210	5	3D	5,4 - 5,0	5,2		
48	48,10942	16,20433	210	8	144	17.08.2000	08:22	184	210	5	3D	5,4 - 5,0	5,2		
49	48,10998	16,20590	184	9	145	17.08.2000	08:28	184		(4)	2D	3,1	3,1		
50	48,10998	16,20590	184	9	146	17.08.2000	08:29	184		(5)	2D	2,8 - 2,7	2,7		
51	48,10994	16,20608	184	9	147	17.08.2000	08:31	184		(5)	2D	2,8 - 2,7	2,7		
52	48,10961	16,20538	210	10	148	17.08.2000	08:34	184	210	5	3D	4,4	4,4		
53	48,10966	16,20543	180	10	149	17.08.2000	08:36	184	180	5	3D	4,2	4,2		
54	48,10961	16,20540	180	10	150	17.08.2000	08:37	184	180	5	3D	4,2	4,2		
													4,7		

Anhang 2a

Messdaten

WPT-Nr.	N	E	H (mittel)	Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	DOP gemittelt	EPE	EPE gemittelt
Garmin III															
1	48,11005	16,20371	198	1	151	19.08.2000	22:12	184	190 - 205	5 - 6	3D	1,5	1,5	5	5
2	48,11009	16,20376	198	1	152	19.08.2000	22:13	184	190 - 205	5 - 6	3D	1,5	1,5	5	5
3	48,11010	16,20373	198	1	153	19.08.2000	22:15	184	190 - 205	5 - 6	3D	1,5	1,5	5	5
4	48,11008	16,20366	190	1	154	20.08.2000	07:20	184	182 - 197	6 - 7	3D	1,7 - 1,8	1,8	7 - 6	6,5
5	48,11011	16,20363	190	1	155	20.08.2000	07:22	184	182 - 197	6 - 7	3D	1,7 - 1,8	1,8	7 - 6	6,5
6	48,11009	16,20369	190	1	156	20.08.2000	07:23	184	182 - 197	6 - 7	3D	1,7 - 1,8	1,8	7 - 6	6,5
7	48,11059	16,20317	191	2	157	20.08.2000	07:27	184	190 - 192	6 - 7	3D	1,4 - 1,7	1,5	6 - 5	5,5
8	48,11058	16,20317	191	2	158	20.08.2000	07:28	184	190 - 192	6 - 7	3D	1,4 - 1,7	1,5	6 - 5	5,5
9	48,11058	16,20314	191	2	159	20.08.2000	07:29	184	190 - 192	6 - 7	3D	1,4 - 1,7	1,5	6 - 5	5,5
10	48,11085	16,20462	189	3	160	20.08.2000	07:34	184	186 - 192	5 - 7	3D	2,2 - 2,5	2,4	12 - 8	10
11	48,11086	16,20463	189	3	161	20.08.2000	07:35	184	186 - 192	5 - 7	3D	2,2 - 2,5	2,4	12 - 8	10
12	48,11087	16,20460	189	3	162	20.08.2000	07:36	184	186 - 192	5 - 7	3D	2,2 - 2,5	2,4	12 - 8	10
13	48,11090	16,20519	190	4	163	20.08.2000	07:39	184	187 - 192	6 - 7	3D	2,2	2,2	9	9
14	48,11092	16,20516	190	4	164	20.08.2000	07:40	184	187 - 192	6 - 7	3D	2,2	2,2	9	9
15	48,11093	16,20517	190	4	165	20.08.2000	07:41	184	187 - 192	6 - 7	3D	2,2	2,2	9	9
16	48,11068	16,20533	216	5	166	20.08.2000	07:45	184	162 - 270	4 - 6	3D	3,4 - 4,5	3,9	28 - 13	20,5
17	48,11069	16,20533	216	5	167	20.08.2000	07:46	184	162 - 270	4 - 6	3D	3,4 - 4,5	3,9	28 - 13	20,5
18	48,11073	16,20534	216	5	168	20.08.2000	07:47	184	162 - 270	4 - 6	3D	3,4 - 4,5	3,9	28 - 13	20,5
19	48,11059	16,20527	252	6	169	20.08.2000	07:52	184	255 - 249	4 - 5	3D	7,0 - 2,1	4,6	27 - 8	17,5
20	48,11059	16,20526	252	6	170	20.08.2000	07:54	184	255 - 249	4 - 5	3D	7,0 - 2,1	4,6	27 - 8	17,5
21	48,11057	16,20525	252	6	171	20.08.2000	07:55	184	255 - 249	4 - 5	3D	7,0 - 2,1	4,6	27 - 8	17,5
22	48,10991	16,20453	200	7	172	20.08.2000	08:02	184	196 - 203	7 - 8	3D	1,5 - 1,2	1,3	6 - 5	5,5
23	48,10993	16,20454	200	7	173	20.08.2000	08:03	184	196 - 203	7 - 8	3D	1,5 - 1,2	1,3	6 - 5	5,5
24	48,10990	16,20453	200	7	174	20.08.2000	08:04	184	196 - 203	7 - 8	3D	1,5 - 1,2	1,3	6 - 5	5,5
25	48,10935	16,20428	194	8	175	20.08.2000	08:07	184	190 - 197	6 - 7	3D	1,8 - 1,7	1,8	7	7
26	48,10936	16,20426	194	8	176	20.08.2000	08:08	184	190 - 197	6 - 7	3D	1,8 - 1,7	1,8	7	7
27	48,10936	16,20426	194	8	177	20.08.2000	08:09	184	190 - 197	6 - 7	3D	1,8 - 1,7	1,8	7	7
28	48,10989	16,20611	220	9	178	20.08.2000	08:14	184	192 - 247	6 - 8	3D	3,0 - 1,3	2,1	12 - 5	8,5
29	48,10989	16,20610	220	9	179	20.08.2000	08:16	184	192 - 247	6 - 8	3D	3,0 - 1,3	2,1	12 - 5	8,5
30	48,10990	16,20603	220	9	180	20.08.2000	08:17	184	192 - 247	6 - 8	3D	3,0 - 1,3	2,1	12 - 5	8,5
31	48,10966	16,20537	198	10	181	20.08.2000	08:20	184	196 - 200	6 - 7	3D	1,4 - 1,6	1,5	5 - 6	5,5
32	48,10964	16,20539	198	10	182	20.08.2000	08:22	184	196 - 200	6 - 7	3D	1,4 - 1,6	1,5	5 - 6	5,5
33	48,10964	16,20538	198	10	183	20.08.2000	08:23	184	196 - 200	6 - 7	3D	1,4 - 1,6	1,5	5 - 6	5,5
34	ausgelassen					20.08.2000									
35	48,11009	16,20369	198	1	184	20.08.2000	20:10	184	194 - 202	4	3D	3,8 - 4,7	4,3	15 - 19	17
36	48,11007	16,20372	198	1	185	20.08.2000	20:12	184	194 - 202	4	3D	3,8 - 4,7	4,3	15 - 19	17
37	48,11007	16,20370	198	1	186	20.08.2000	20:13	184	194 - 202	4	3D	3,8 - 4,7	4,3	15 - 19	17
38	48,11047	16,20321	191	2	187	20.08.2000	20:16	184	187 - 195	4 - 5	3D	2,6 - 2,0	2,3	25 - 8	16,5
39	48,11056	16,20319	191	2	188	20.08.2000	20:18	184	187 - 195	4 - 5	3D	2,6 - 2,0	2,3	25 - 8	16,5
40	48,11058	16,20318	191	2	189	20.08.2000	20:19	184	187 - 195	4 - 5	3D	2,6 - 2,0	2,3	25 - 8	16,5
41	48,11076	16,20470	135	3	190	20.08.2000	20:23	184	81 - 188	4	3D	2,5	2,5	24 - 69	46,5
42	48,11080	16,20466	135	3	191	20.08.2000	20:24	184	81 - 188	4	3D	2,5	2,5	24 - 69	46,5
43	48,11069	16,20473	135	3	192	20.08.2000	20:25	184	81 - 188	4	3D	2,5	2,5	24 - 69	46,5
44	48,11093	16,20517	197	4	193	20.08.2000	20:29	184	180 - 214	4 - 5	3D	2,6	2,6	10	10
45	48,11093	16,20517	197	4	194	20.08.2000	20:30	184	180 - 214	4 - 5	3D	2,6	2,6	10	10
46	48,11093	16,20518	197	4	195	20.08.2000	20:32	184	180 - 214	4 - 5	3D	2,6	2,6	10	10
47	48,11067	16,20541	212	5	196	20.08.2000	20:35	184	196 - 227	4 - 5	3D	2,4 - 2,0	2,2	10 - 9	9,5
48	48,11066	16,20540	212	5	197	20.08.2000	20:36	184	196 - 227	4 - 5	3D	2,4 - 2,0	2,2	10 - 9	9,5
49	48,11064	16,20540	212	5	198	20.08.2000	20:37	184	196 - 227	4 - 5	3D	2,4 - 2,0	2,2	10 - 9	9,5
50	48,10985	16,20455	201	7	199	20.08.2000	20:47	184	198 - 203	4 - 5	3D	2,4 - 2,5	2,4	10	10
51	48,10987	16,20454	201	7	200	20.08.2000	20:48	184	198 - 203	4 - 5	3D	2,4 - 2,5	2,4	10	10
52	48,10988	16,20455	201	7	201	20.08.2000	20:49	184	198 - 203	4 - 5	3D	2,4 - 2,5	2,4	10	10

Anhang 2a

Messdaten

WPT-Nr.	N	E	H (mittel)	Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	DOP gemittelt	EPE	EPE gemittelt
53	48,10946	16,20435	207	8	202	20.08.2000	20:54	184	190 - 224	4 - 6	3D	3,7 - 1,8	2,8	15 - 9	12
54	48,10941	16,20431	207	8	203	20.08.2000	20:56	184	190 - 224	4 - 6	3D	3,7 - 1,8	2,8	15 - 9	12
55	48,10938	16,20431	207	8	204	20.08.2000	20:57	184	190 - 224	4 - 6	3D	3,7 - 1,8	2,8	15 - 9	12
56	48,11000	16,20594	206	9	205	20.08.2000	21:02	184	202 - 210	4	3D	3,3 - 3,5	3,4	14 - 15	14,5
57	48,11004	16,20593	206	9	206	20.08.2000	21:03	184	202 - 210	4	3D	3,3 - 3,5	3,4	14 - 15	14,5
58	48,11000	16,20592	206	9	207	20.08.2000	21:04	184	202 - 210	4	3D	3,3 - 3,5	3,4	14 - 15	14,5
59	48,10969	16,20543	196	10	208	20.08.2000	21:07	184	184 - 208	4 - 5	3D	2,9 - 2,0	2,4	12 - 8	10
60	48,10974	16,20541	196	10	209	20.08.2000	21:08	184	184 - 208	4 - 5	3D	2,9 - 2,0	2,4	12 - 8	10
61	48,10967	16,20543	196	10	210	20.08.2000	21:10	184	184 - 208	4 - 5	3D	2,9 - 2,0	2,4	12 - 8	10
62	48,11012	16,20369	180	1	211	21.08.2000	06:55	184	175 - 185	6 - 7	3D	1,7 - 1,4	1,6	7 - 6	6,5
63	48,11008	16,20376	180	1	212	21.08.2000	06:56	184	175 - 185	6 - 7	3D	1,7 - 1,4	1,6	7 - 6	6,5
64	48,11011	16,20374	180	1	213	21.08.2000	06:57	184	175 - 185	6 - 7	3D	1,7 - 1,4	1,6	7 - 6	6,5
65	48,11059	16,20317	186	2	214	21.08.2000	07:01	184	182 - 189	5 - 6	3D	2,2 - 1,7	1,9	9 - 7	8
66	48,11059	16,20317	186	2	215	21.08.2000	07:02	184	182 - 189	5 - 6	3D	2,2 - 1,7	1,9	9 - 7	8
67	48,11060	16,20316	186	2	216	21.08.2000	07:03	184	182 - 189	5 - 6	3D	2,2 - 1,7	1,9	9 - 7	8
68	48,11088	16,20464	200	3	217	21.08.2000	07:08	184	202 - 198	6 - 8	3D	2,1 - 2,0	2,0	8	8
69	48,11087	16,20461	200	3	218	21.08.2000	07:10	184	202 - 198	6 - 8	3D	2,1 - 2,0	2,0	8	8
70	48,11088	16,20463	200	3	219	21.08.2000	07:10	184	202 - 198	6 - 8	3D	2,1 - 2,0	2,0	8	8
71	48,11096	16,20521	208	4	220	21.08.2000	07:13	184	199 - 216	6 - 7	3D	2,5	2,5	10	10
72	48,11100	16,20520	208	4	221	21.08.2000	07:14	184	199 - 216	6 - 7	3D	2,5	2,5	10	10
73	48,11099	16,20523	208	4	222	21.08.2000	07:15	184	199 - 216	6 - 7	3D	2,5	2,5	10	10
74	48,11066	16,20537	199	6	223	21.08.2000	07:18	184	185 - 213	5 - 6	3D	2,1 - 2,6	2,4	21 - 24	22,5
75	48,11069	16,20545	199	6	224	21.08.2000	07:19	184	185 - 213	5 - 6	3D	2,1 - 2,6	2,4	21 - 24	22,5
76	48,11068	16,20542	199	6	225	21.08.2000	07:20	184	185 - 213	5 - 6	3D	2,1 - 2,6	2,4	21 - 24	22,5
77	48,10991	16,20457	186	7	226	21.08.2000	07:25	184	193 - 179	5	3D	3,7 - 3,6	3,6	15 - 14	14,5
78	48,10988	16,20457	186	7	227	21.08.2000	07:27	184	193 - 179	5	3D	3,7 - 3,6	3,6	15 - 14	14,5
79	48,10987	16,20455	186	7	228	21.08.2000	07:28	184	193 - 179	5	3D	3,7 - 3,6	3,6	15 - 14	14,5
80	48,10934	16,20426	202	8	229	21.08.2000	07:31	184	183 - 221	6 - 7	3D	2,7 - 1,9	2,3	25 - 6	15,5
81	48,10931	16,20425	202	8	230	21.08.2000	07:32	184	183 - 221	6 - 7	3D	2,7 - 1,9	2,3	25 - 6	15,5
82	48,10928	16,20416	202	8	231	21.08.2000	07:33	184	183 - 221	6 - 7	3D	2,7 - 1,9	2,3	25 - 6	15,5
83	48,10988	16,20591	197	9	232	21.08.2000	07:38	184	213 - 181	6 - 7	3D	2,0 - 3,7	2,9	7 - 20	13,5
84	48,10991	16,20594	197	9	233	21.08.2000	07:39	184	213 - 181	6 - 7	3D	2,0 - 3,7	2,9	7 - 20	13,5
85	48,10991	16,20596	197	9	234	21.08.2000	07:40	184	213 - 181	6 - 7	3D	2,0 - 3,7	2,9	7 - 20	13,5
86	48,10967	16,20538	191	10	235	21.08.2000	07:43	184	189 - 192	6 - 7	3D	3,5 - 1,3	2,4	14 - 5	14,5
87	48,10965	16,20541	191	10	236	21.08.2000	07:45	184	189 - 192	6 - 7	3D	3,5 - 1,3	2,4	14 - 5	14,5
88	48,10967	16,20540	191	10	237	21.08.2000	07:46	184	189 - 192	6 - 7	3D	3,5 - 1,3	2,4	14 - 5	14,5
89	48,11073	16,20536	196	5	238	21.08.2000	07:52	184	187 - 204	5 - 6	3D	7,4 - 2,8	5,1	33 - 10	21,5
90	48,11071	16,20538	196	5	239	21.08.2000	07:53	184	187 - 204	5 - 6	3D	7,4 - 2,8	5,1	33 - 10	21,5
91	48,11074	16,20538	196	5	240	21.08.2000	07:55	184	187 - 204	5 - 6	3D	7,4 - 2,8	5,1	33 - 10	21,5
92	48,11016	16,20366	209	1	241	22.08.2000	20:28	184	179 - 238	4 - 5	3D	2,3 - 2,2	2,2	53 - 37	45
93	48,11014	16,20368	209	1	242	22.08.2000	20:29	184	179 - 238	4 - 5	3D	2,3 - 2,2	2,2	53 - 37	45
94	48,10999	16,20375	209	1	243	22.08.2000	20:31	184	179 - 238	4 - 5	3D	2,3 - 2,2	2,2	53 - 37	45
95	48,11054	16,20318	206	2	244	22.08.2000	20:34	184	198 - 214	4 - 5	3D	2,5	2,5	10	10
96	48,11057	16,20318	206	2	245	22.08.2000	20:35	184	198 - 214	4 - 5	3D	2,5	2,5	10	10
97	48,11058	16,20316	206	2	246	22.08.2000	20:36	184	198 - 214	4 - 5	3D	2,5	2,5	10	10
98	48,11085	16,20465	190	3	247	22.08.2000	20:40	184	184 - 195	4 - 5	3D	4,2 - 3,7	4,0	17 - 15	16
99	48,11087	16,20465	190	3	248	22.08.2000	20:42	184	184 - 195	4 - 5	3D	4,2 - 3,7	4,0	17 - 15	16
100	48,11085	16,20465	190	3	249	22.08.2000	20:43	184	184 - 195	4 - 5	3D	4,2 - 3,7	4,0	17 - 15	16
101	48,11072	16,20538	219	5	250	22.08.2000	20:50	184	217 - 221	4	3D	2,5 - 3,2	2,8	11 - 24	17,5
102	48,11079	16,20545	219	5	251	22.08.2000	20:52	184	217 - 221	4	3D	2,5 - 3,2	2,8	11 - 24	17,5
103	48,11091	16,20549	219	5	252	22.08.2000	20:53	184	217 - 221	4	3D	2,5 - 3,2	2,8	11 - 24	17,5
104	48,11097	16,20519	201	4	253	22.08.2000	20:58	184	198 - 203	4 - 6	3D	2,8 - 2,9	2,9	12	12
105	48,11093	16,20518	201	4	254	22.08.2000	20:59	184	198 - 203	4 - 6	3D	2,8 - 2,9	2,9	12	12

Anhang 2a

Messdaten

WPT-Nr.	N	E	H (mittel)	Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	DOP gemittelt	EPE	EPE gemittelt
106	48,11100	16,20519	201	4	255	22.08.2000	21:00	184	198 - 203	4 - 6	3D	2,8 - 2,9	2,9	12	12
107	48,11072	16,20545	203	6	256	22.08.2000	21:02	184	198 - 207	4	3D	3,0 - 2,7	2,8	12	12
108	48,11069	16,20539	203	6	257	22.08.2000	21:04	184	198 - 207	4	3D	3,0 - 2,7	2,8	12	12
109	48,11070	16,20540	203	6	258	22.08.2000	21:05	184	198 - 207	4	3D	3,0 - 2,7	2,8	12	12
110	48,10994	16,20457	220	7	259	22.08.2000	21:09	184	189 - 250	4 - 6	3D	3,3 - 1,7	2,5	12 - 7	9,5
111	48,10997	16,20454	220	7	260	22.08.2000	21:11	184	189 - 250	4 - 6	3D	3,3 - 1,7	2,5	12 - 7	9,5
112	48,10995	16,20451	220	7	261	22.08.2000	21:13	184	189 - 250	4 - 6	3D	3,3 - 1,7	2,5	12 - 7	9,5
113	48,11028	16,20366	219	1	262	24.08.2000	20:32	184	236 - 202	4 - 5	3D	4,2 - 3,7	4,0	17 - 14	15,5
114	48,11010	16,20372	219	1	263	24.08.2000	20:33	184	236 - 202	4 - 5	3D	4,2 - 3,7	4,0	17 - 14	15,5
115	48,11011	16,20373	219	1	264	24.08.2000	20:34	184	236 - 202	4 - 5	3D	4,2 - 3,7	4,0	17 - 14	15,5
116	48,10937	16,20429	192	8	265	24.08.2000	20:39	184	197 - 187	5 - 7	3D	1,2 - 1,6	1,4	5	5
117	48,10936	16,20433	192	8	266	24.08.2000	20:40	184	197 - 187	5 - 7	3D	1,2 - 1,6	1,4	5	5
118	48,10938	16,20429	192	8	267	24.08.2000	20:41	184	197 - 187	5 - 7	3D	1,2 - 1,6	1,4	5	5
119	48,11000	16,20591	203	9	268	24.08.2000	20:45	184	200 - 206	4	3D	3,3 - 3,5	3,4	14	14
120	48,10993	16,20594	203	9	269	24.08.2000	20:46	184	200 - 206	4	3D	3,3 - 3,5	3,4	14	14
121	48,10991	16,20595	203	9	270	24.08.2000	20:47	184	200 - 206	4	3D	3,3 - 3,5	3,4	14	14
122	48,10959	16,20540	197	10	271	24.08.2000	20:51	184	189 - 205	4 - 6	3D	2,9 - 2,0	2,4	12 - 8	10
123	48,10969	16,20538	197	10	272	24.08.2000	20:52	184	189 - 205	4 - 6	3D	2,9 - 2,0	2,4	12 - 8	10
124	48,10968	16,20538	197	10	273	24.08.2000	20:54	184	189 - 205	4 - 6	3D	2,9 - 2,0	2,4	12 - 8	10
													2,6		13,4
													3,7		

Anhang 2b

Berechnung der Fehlermaße nach Stationen und Empfängern

Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	EPE	Empfänger	GK Y [m]	GK X [m]	H orth. [m]	DY	DX	DY ²	DX ²	DY x DX	DS	DS	DS	DS	DS	DS		
Ref. 1											549,060	338340,290														
T+G																										
T																										
G																										
1	1	13.08.2000	11:13	200		3	2D	3,8 - 3,5		Trimble	546,292	338349,615	154,573	-2,768	9,325	7,661824	86,955625	-25,811600	9,727	2,448	2,135	0,540	0,688	0,540		
1	2	13.08.2000	11:14	200		3	2D	3,8 - 3,5		Trimble	541,335	338355,174	154,573	-7,725	14,884	59,675625	221,533456	-114,978900	16,769	2,907	2,448	0,688	0,691	0,688		
1	3	13.08.2000	11:15	200		3	2D	3,8 - 3,5		Trimble	547,531	338358,881	154,573	-1,529	18,591	2,337841	345,625281	-28,425639	18,654	3,659	2,768	0,688	0,943	0,688		
1	13	13.08.2000	12:13	200	180 - 210	4	3D	5,3		Trimble	545,053	338340,348	149,573	-4,007	0,058	16,056049	0,003364	-0,232406	4,007	3,776	2,768	0,691	0,943	0,688		
1	14	13.08.2000	12:15	200	180 - 210	4	3D	5,3		Trimble	568,600	338355,175	149,574	19,540	14,885	381,811600	221,563225	290,852900	24,564	4,007	2,907	0,691	1,134	0,691		
1	15	13.08.2000	12:16	200	180 - 210	4	3D	5,3		Trimble	559,925	338347,762	149,574	10,865	7,472	118,048225	55,830784	81,183280	13,186	4,356	2,907	1,169	1,134	0,691		
1	28	14.08.2000	11:28	184		3	2D	3,7 - 4,1		Trimble	554,969	338331,083	138,573	5,909	-9,207	34,916281	84,768849	-54,404163	10,940	5,007	3,659	1,543	1,135	0,691		
1	29	14.08.2000	11:29	184		3	2D	3,7 - 4,1		Trimble	552,490	338336,642	138,573	3,430	-3,648	11,764900	13,307904	-12,512640	5,007	5,509	3,770	1,587	1,559	0,943		
1	30	14.08.2000	11:30	184		3	2D	3,7 - 4,1		Trimble	541,337	338314,403	138,573	-7,723	-25,887	59,644729	670,136769	199,925301	27,014	5,509	3,776	1,610	1,629	0,943		
1	36	14.08.2000	12:06	184	180 - 240	4	3D	5,3		Trimble	548,771	338336,642	164,573	-0,289	-3,648	0,083521	13,307904	1,054272	3,659	6,030	3,955	1,717	1,717	1,134		
1	37	14.08.2000	12:07	184	180 - 240	4	3D	5,3		Trimble	563,643	338360,735	164,574	14,583	20,445	212,663889	417,998025	298,149435	25,113	7,304	4,007	1,821	1,821	1,134		
1	38	14.08.2000	12:09	184	180 - 240	4	3D	5,3		Trimble	558,686	338344,055	164,573	9,626	3,765	92,659876	14,175225	36,241890	10,336	9,213	4,356	1,962	1,924	1,135		
1	39	14.08.2000	12:10	184	180 - 240	4	3D	5,3		Trimble	558,686	338351,468	164,574	9,626	11,178	92,659876	124,947684	107,599428	14,752	9,727	4,356	1,988	2,087	1,169		
1	40	14.08.2000	12:11	184	180 - 240	4	3D	5,3		Trimble	522,746	338314,402	164,572	-26,314	-25,888	692,426596	670,188544	681,216832	36,914	9,825	5,007	2,448	2,135	1,543		
1	41	14.08.2000	12:12	184	180 - 240	4	3D	5,3		Trimble	553,728	338345,908	164,573	4,668	5,618	21,790224	31,561924	26,224824	7,304	9,825	5,007	2,456	2,176	1,559		
1		14.08.2000	20:15			2	keine			Trimble										9,894	5,509	2,907	2,176	1,587		
1	73	14.08.2000	20:55	184		(4)	2D	2,5 - 2,4		Trimble	552,490	338331,083	138,573	3,430	-9,207	11,764900	84,768849	-31,580010	9,825	10,336	5,909	2,928	2,267	1,610		
1	74	14.08.2000	20:57	184		(4)	2D	2,5 - 2,4		Trimble	552,490	338329,229	138,573	3,430	-11,061	11,764900	122,345721	-37,939230	11,581	10,876	5,908	3,427	2,348	1,629		
1	75	14.08.2000	20:59	184		(4)	2D	2,5 - 2,4		Trimble	552,490	338331,083	138,573	3,430	-9,207	11,764900	84,768849	-31,580010	9,825	10,940	6,030	3,550	2,539	1,717		
1	85	15.08.2000	07:00	184	180	(4)	3D	7,2 - 7,5		Trimble	551,250	338342,202	134,573	2,190	1,912	4,796100	3,655744	4,187280	2,907	11,581	6,174	3,587	2,553	1,717		
1	86	15.08.2000	07:02	184	180	5	3D	3,8 - 3,7		Trimble	561,165	338340,349	134,574	12,105	0,059	146,531025	0,003481	0,714195	12,105	12,105	6,262	3,642	2,661	1,821		
1	87	15.08.2000	07:04	184		(5)	2D	3,7		Trimble	551,250	338344,055	138,573	2,190	3,765	4,796100	14,175225	8,245350	4,356	13,186	6,729	3,659	2,766	1,821		
1		16.08.2000	20:05			2	keine			Trimble										14,752	7,304	3,776	2,767	1,924		
1	109	16.08.2000	20:47	184		(4)	2D	2,5		Trimble	548,772	338331,082	138,573	-0,288	-9,208	0,082944	84,787264	2,651904	9,213	16,279	7,360	4,007	2,768	1,962		
1	110	16.08.2000	20:48	184		(4)	2D	2,5		Trimble	548,772	338334,789	138,573	-0,288	-5,501	0,082944	30,261001	1,584288	5,509	16,769	9,213	4,016	2,768	1,988		
1	111	16.08.2000	20:49	184		(4)	2D	2,5		Trimble	548,772	338334,789	138,573	-0,288	-5,501	0,082944	30,261001	1,584288	5,509	18,654	9,727	4,016	2,907	2,087		
1	124	17.08.2000	07:30	184		(4)	2D	11,7		Trimble	562,404	338349,615	138,574	13,344	9,325	178,062336	86,955625	124,432800	16,279	24,564	9,825	4,018	2,917	2,135		
1	125	17.08.2000	07:31	184		(5)	2D	2,8		Trimble	547,532	338342,202	138,573	-1,528	1,912	2,334784	3,655744	-2,921536	2,448	25,113	9,825	4,119	3,049	2,176		
1	126	17.08.2000	07:33	184		(5)	2D	2,7		Trimble	548,771	338344,055	138,573	-0,289	3,765	0,083521	14,175225	-1,088085	3,776	27,014	9,894	4,135	3,092	2,176		
1	139	17.08.2000	08:13	184	210	4	3D	5,4 - 5,3		Trimble	551,250	338345,908	164,573	2,190	5,618	4,796100	31,561924	12,303420	6,030	36,914	10,149	4,193	3,324	2,267		
1	140	17.08.2000	08:14	184	210	5	3D	3,7		Trimble	542,574	338347,761	164,573	-6,486	7,471	42,068196	55,815841	-48,456906	9,894		10,336	4,259	3,527	2,348		
1	141	17.08.2000	08:16	184	210	5	3D	3,7		Trimble	538,856	338344,054	164,573	-10,204	3,764	104,121616	14,167696	-38,407856	10,876	30	10,875	4,293	3,545	2,448		
							14	16																		
1	151	19.08.2000	22:12	184	190 - 205	5 - 6	3D	1,5	5	Garmin	548,772	338332,936	152,573	-0,288	-7,354	0,082944	54,081316	2,117952	7,360	2,135	11,581	4,575	3,770	2,553		
1	152	19.08.2000	22:13	184	190 - 205	5 - 6	3D	1,5	5	Garmin	554,968	338340,349	152,573	5,908	0,059	34,904464	0,003481	0,348572	5,908	2,768	12,105	4,675	3,876	2,661		
1	153	19.08.2000	22:15	184	190 - 205	5 - 6	3D	1,5	5	Garmin	551,250	338342,202	152,573	2,190	1,912	4,796100	3,655744	4,187280	2,907	2,768	13,186	4,766	3,955	2,766		
1	154	20.08.2000	07:20	184	182 - 197	6 - 7	3D	1,7 - 1,8	7 - 6	Garmin	542,575	338338,495	144,573	-6,485	-1,795	42,055225	3,222025	11,640575	6,729	2,907	14,556	5,007	4,186	2,767		
1	155	20.08.2000	07:22	184	182 - 197	6 - 7	3D	1,7 - 1,8	7 - 6	Garmin	538,857	338344,055	144,573	-10,203	3,765	104,101209	14,175225	-38,414295	10,875	3,770	14,752	5,008	4,195	2,768		
1	156	20.08.2000	07:23	184	182 - 197	6 - 7	3D	1,7 - 1,8	7 - 6	Garmin	546,293	338340,348	144,573	-2,767	0,058	7,656289	0,003364	-0,160486	2,768	3,955	16,279	5,077	4,195	2,768		
1	184	20.08.2000	20:10	184	194 - 202	4	3D	3,8 - 4,7	15 - 19	Garmin	546,293	338340,348	152,573	-2,767	0,058	7,656289	0,003364	-0,160486	2,768	4,356	16,769	5,133	4,195	2,907		
1	185	20.08.2000	20:12	184	194 - 202	4	3D	3,8 - 4,7	15 - 19	Garmin	550,011	338336,642	152,573	0,951	-3,648	0,904401	13,307904	-3,469248	3,770	5,093	18,654	5,422	4,214	2,907		
1	186	20.08.2000	20:13	184	194 - 202	4	3D	3,8 - 4,7	15 - 19	Garmin	547,532	338336,642	152,573	-1,528	-3,648	2,334784	13,307904	5,574144	3,955	5,908	19,055	5,441	4,356	2,917		
1	211	21.08.2000	06:55	184	175 - 185	6 - 7	3D	1,7 - 1,4	7 - 6	Garmin	546,293	338345,908	1													

Anhang 2b

Berechnung der Fehlermaße nach Stationen und Empfängern

Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	EPE	Empfänger	GK Y [m]	GK X [m]	H orth. [m]	DY	DX	DY ²	DX ²	DY x DX	DS	DS	DS	DS	DS	DS			
2	4	13.08.2000	11:20	200			3	2D	3,1 - 2,9	Trimble	480,604	338442,274	154,572	-0,996	13,454	0,992016	181,010116	-13,400184	13,491	0,540	0,540	6,894	6,174	3,876			
2	5	13.08.2000	11:22	200			3	2D	3,1 - 2,9	Trimble	479,365	338447,834	154,572	-2,235	19,014	4,995225	361,532196	-42,496290	19,145	3,550	1,559	6,979	6,192	3,955			
2	6	13.08.2000	11:23	200			3	2D	3,1 - 2,9	Trimble	483,083	338442,274	154,572	1,483	13,454	2,199289	181,010116	19,952282	13,535	3,587	2,348	7,088	6,262	4,007			
2		14.08.2000	11:35				2	keine		Trimble										5,441	2,539	7,152	6,275	4,016			
2	56	14.08.2000	20:23	184	210		4	3D	5,6 - 5,2	Trimble	479,365	338420,035	164,571	-2,235	-8,785	4,995225	77,176225	19,634475	9,065	6,220	2,766	7,226	6,338	4,016			
2	57	14.08.2000	20:25	184	210		4	3D	5,6 - 5,2	Trimble	484,323	338412,622	164,572	2,723	-16,198	7,414729	262,375204	-44,107154	16,425	7,088	3,049	7,304	6,491	4,018			
2	58	14.08.2000	20:26	184	210		4	3D	5,6 - 5,2	Trimble	483,083	338434,861	164,572	1,483	6,041	2,199289	36,493681	8,958803	6,220	9,065	3,550	7,325	6,491	4,119			
2	88	15.08.2000	07:08	184			3	2D	7,8 - 7,9	Trimble	481,844	338429,302	138,572	0,244	0,482	0,059536	0,232324	0,117608	0,540	10,189	3,587	7,341	6,715	4,135			
2	89	15.08.2000	07:10	184			(4)	2D	4,8 - 4,4	Trimble	483,084	338421,889	138,572	1,484	-6,931	2,202256	48,038761	-10,285604	7,088	13,351	4,186	7,576	6,729	4,186			
2	90	15.08.2000	07:11	184			(4)	2D	4,8 - 4,4	Trimble	483,084	338425,595	138,572	1,484	-3,225	2,202256	10,400625	-4,785900	3,550	13,491	4,195	7,576	6,987	4,193			
2	97	16.08.2000	20:18	184	180		4	3D	5,1 - 4,8	Trimble	475,648	338416,329	134,571	-5,952	-12,491	35,426304	156,025081	74,346432	13,837	13,535	4,195	7,675	6,997	4,195			
2	98	16.08.2000	20:19	184	180		4	3D	5,1 - 4,8	Trimble	476,887	338416,329	134,571	-4,713	-12,491	22,212369	156,025081	58,870083	13,351	13,837	4,195	8,046	7,123	4,195			
2	99	16.08.2000	20:20	184	180		4	3D	5,1 - 4,8	Trimble	480,605	338414,476	134,571	-0,995	-14,344	0,990025	205,750336	14,272280	14,378	14,378	5,290	8,046	7,228	4,195			
2	127	17.08.2000	07:36	184			(4)	2D	3,3	Trimble	488,041	338436,715	138,572	6,441	7,895	41,486481	62,331025	50,851695	10,189	16,425	5,441	8,111	7,360	4,214			
2	128	17.08.2000	07:37	184	180		5	3D	3,9 - 4,0	Trimble	484,323	338431,155	134,572	2,723	2,335	7,414729	5,452225	6,358205	3,587	19,145	6,122	8,230	7,377	4,259			
2	129	17.08.2000	07:38	184	180		5	3D	3,9 - 4,0	Trimble	478,126	338433,008	134,572	-3,474	4,188	12,068676	17,539344	-14,549112	5,441	15	6,220	8,624	7,628	4,293			
							8		7												7,088	8,653	7,711	4,356			
																						9,065	8,653	7,841	4,356		
2	157	20.08.2000	07:27	184	190 - 192	6 - 7	3D	1,4 - 1,7	6 - 5	Garmin	481,844	338433,008	145,572	0,244	4,188	0,059536	17,539344	1,021872	4,195	1,559	10,189	8,840	7,965	4,387			
2	158	20.08.2000	07:28	184	190 - 192	6 - 7	3D	1,4 - 1,7	6 - 5	Garmin	481,844	338431,155	145,572	0,244	2,335	0,059536	5,452225	0,569740	2,348	2,348	13,351	9,065	8,032	4,427			
2	159	20.08.2000	07:29	184	190 - 192	6 - 7	3D	1,4 - 1,7	6 - 5	Garmin	478,126	338431,155	145,572	-3,474	2,335	12,068676	5,452225	-8,111790	4,186	2,539	13,491	9,213	8,410	4,575			
2	187	20.08.2000	20:16	184	187 - 195	4 - 5	3D	2,6 - 2,0	25 - 8	Garmin	486,802	338410,769	145,572	5,202	-18,051	27,060804	325,838601	-93,901302	18,786	2,766	17,639	13,535	9,328	8,976	4,675		
2	188	20.08.2000	20:18	184	187 - 195	4 - 5	3D	2,6 - 2,0	25 - 8	Garmin	484,323	338427,448	145,572	2,723	-1,372	7,414729	1,882384	-3,735956	3,049	3,049	13,837	9,402	9,089	4,762			
2	189	20.08.2000	20:19	184	187 - 195	4 - 5	3D	2,6 - 2,0	25 - 8	Garmin	483,083	338431,155	145,572	1,483	2,335	2,199289	5,452225	3,462805	2,766	4,186	14,378	9,647	9,152	4,766			
2	214	21.08.2000	07:01	184	182 - 189	5 - 6	3D	2,2 - 1,7	9 - 7	Garmin	481,844	338433,008	140,572	0,244	4,188	0,059536	17,539344	1,021872	4,195	4,195	16,425	9,727	9,551	5,007			
2	215	21.08.2000	07:02	184	182 - 189	5 - 6	3D	2,2 - 1,7	9 - 7	Garmin	481,844	338433,008	140,572	0,244	4,188	0,059536	17,539344	1,021872	4,195	4,195	18,786	9,776	10,149	5,008			
2	216	21.08.2000	07:03	184	182 - 189	5 - 6	3D	2,2 - 1,7	9 - 7	Garmin	480,605	338434,861	140,572	-0,995	6,041	0,990025	36,493681	-6,010795	6,122	4,195	19,145	9,825	10,875	5,032			
2	244	22.08.2000	20:34	184	198 - 214	4 - 5	3D	2,5	10	Garmin	483,083	338423,742	160,572	1,483	-5,078	2,199289	25,786084	-7,530674	5,290	5,290		9,825	10,952	5,077			
2	245	22.08.2000	20:35	184	198 - 214	4 - 5	3D	2,5	10	Garmin	483,083	338429,301	160,572	1,483	0,481	2,199289	0,231361	0,713323	1,559	6,122		9,851	11,036	5,077			
2	246	22.08.2000	20:36	184	198 - 214	4 - 5	3D	2,5	10	Garmin	480,604	338431,155	160,572	-0,996	2,335	0,992016	5,452225	-2,325660	2,539	18,786		9,877	11,086	5,093			
							12		0												12		9,894	11,186	5,133		
																							10,189	11,243	5,290		
Ref. 3											662,100	338486,870												10,281	11,356	5,354	
T+G																									10,336	11,364	5,422
T																									10,650	11,378	5,441
G																									10,733	11,698	5,488
3	7	13.08.2000	11:33	200			3	2D	2,4 - 2,5	Trimble	665,260	338499,733	154,579	3,160	12,863	9,985600	165,456769	40,647080	13,245	0,691	0,691	10,853	13,120	5,509			
3	8	13.08.2000	11:34	200			3	2D	2,4 - 2,5	Trimble	665,260	338499,733	154,579	3,160	12,863	9,985600	165,456769	40,647080	13,245	0,691	0,691	10,876	13,270	5,509			
3	9	13.08.2000	11:36	200			3	2D	2,4 - 2,5	Trimble	664,019	338516,413	154,579	1,919	29,543	3,682561	872,788849	56,693017	29,605	5,739	0,691	10,940	13,489	5,528			
3	31	14.08.2000	11:41	184			3	2D	2,8 - 2,9	Trimble	670,218	338479,348	138,579	8,118	-7,522	65,901924	56,580484	-61,063596	11,067	8,111	1,924	11,067	13,672	5,676			
3	32	14.08.2000	11:42	184			3	2D	2,8 - 2,9	Trimble	667,740	338479,348	138,579	5,640	-7,522	31,809600	56,580484	-42,424080	9,402	8,653	2,661	11,156	13,900	5,676			
3	33	14.08.2000	11:43	184			3	2D	2,8 - 2,9	Trimble	665,261	338473,788	138,578	3,161	-13,082	9,991921	171,138724	-41,352202	13,458	8,653	3,615	11,308	14,105	5,696			
3	59	14.08.2000	20:30	184	210		4	3D	6,6 - 7,1	Trimble	662,782	338486,761	164,578	0,682	-0,109	0,465124	0,011881	-0,074338	0,691	9,402	3,720	11,509	14,151	5,707			
3	60	14.08.2000	20:31	184	210		4	3D	6,6 - 7,1	Trimble	667,740	338470,082	164,578	5,640	-16,788	31,809600	281,836944	-94,684320	17,710	9,647	3,876	11,581	14,556	5,711			
3	61	14.08.2000	20:32	184	210		4	3D	6,6 - 7,1	Trimble	660,302	338497,880	164,578	-1,798	11,010	3,232804	121,220100	-19,795980	11,156	11,067	5,696	11,942	14,859	5,722			
3	91	15.08.2000	07:18	184	210		5	3D	7,3	Trimble	664,020	338503,440	164,579	1,920	16,570	3,686400	274,564900	31,814400	16,681	11,156	5,739	11,992	15,052	5,739			
3	92	15.08.2000	07:19	184	210		6	3D	5,8 - 6,0	Trimble	677,652	338510,854	164,579	15,552	23,984	241,864704	575,232256	372,999168	28,588	13,245	6,491	12,050	15,570	5,748			
3	93	15.08.2000	07:20	184	210		5	3D	6,6 - 6,5	Trimble	662,782	338486,761	164,578	0,682	-0,109	0,465124	0,011881	-0,074338	0,691	13,245	6,491	12,105	15,756	5,752			
3	100	16.08.2000	20:25	184	210		4	3D	7,3 - 7,5	Trimble	657,825	338479,347	164,578	-4,275	-7,523	18,275625	56,595529	32,160825	8,653	13,458	8,111	12,152	18,476	5,799			
3	101	16.08.2000	20:26	184	180		5	3D	7,7 - 7,8	Trimble	657,825	338479,347	134,578	-4,275	-7,523	18,275625	56,595529	32,160825	8,653	16,681	8,653	12,545	18,786	5,869			
3	102	16.0																									

Anhang 2b

Berechnung der Fehlermaße nach Stationen und Empfängern

σ_y	σ_x	q_{yx}	2Θ [°]	$\sigma_p = 1dRMS_{DS}$	2dRMS	3dRMS	CEP $_{\sigma_{Y,X}}$	CEP $_{Daten}$	CEP95 $_{\sigma_{Y,X}}$	CEP99 $_{\sigma_{Y,X}}$	A	B	Θ	1dRMS $_{A,B}$	CEP $_{A,B}$	FCC67	FCC95	
0																		
Stat. 4																		
4,838	9,314	36,262	48,87	10,495	20,991	31,486	8,335	7,341	17,338	21,505	10,160	2,633	24,43	10,495	7,321	11,509	26,103	
6,113	10,679	54,706	54,98	12,305	24,610	36,916	9,897	10,650	20,573	25,518	11,938	2,984	27,49	12,305	8,540	12,050	26,103	
2,785	7,739	16,085	31,68	8,225	16,449	24,674	6,199	2,267	12,893	15,993	8,028	1,787	15,84	8,225	5,617	7,628	13,900	
1																		
0																		
Stat. 5																		
4,991	14,107	43,247	26,42	14,963	29,927	44,890	11,249	7,576	23,397	29,021	14,462	3,842	13,21	14,963	10,475	13,120	-	
2,446	8,089	-2,327	-4,48	8,450	16,901	25,351	6,205	7,325	12,906	16,008	8,094	2,427	178,84	8,450	6,021	9,851	-	
6,254	17,296	77,427	30,77	18,392	36,785	55,177	13,871	9,551	28,852	35,787	17,902	4,219	15,39	18,392	12,660	13,120	26,360	
3																		

Anhang 2b

Berechnung der Fehlermaße nach Stationen und Empfängern

Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	EPE	Empfänger	GK Y [m]	GK X [m]	H orth. [m]	DY	DX	DY ²	DX ²	DY x DX	DS	DS	DS	DS	DS	DS										
5	168	20.08.2000	07:47	184	162 - 270	4 - 6	3D	3,4 - 4,5	28 - 13	Garmin	750,775	338458,968	170,581	-3,225	13,098	10,400625	171,557604	-42,241050	13,489	5,799	13,489			11,067										
5	196	20.08.2000	20:35	184	196 - 227	4 - 5	3D	2,4 - 2,0	10 - 9	Garmin	759,451	338447,849	166,581	5,451	1,979	29,713401	3,916441	10,787529	5,799	5,883	15,052			11,086										
5	197	20.08.2000	20:36	184	196 - 227	4 - 5	3D	2,4 - 2,0	10 - 9	Garmin	758,212	338445,996	166,581	4,212	0,126	17,740944	0,015876	0,530712	4,214	7,228	16,818			11,156										
5	198	20.08.2000	20:37	184	196 - 227	4 - 5	3D	2,4 - 2,0	10 - 9	Garmin	758,212	338442,290	166,581	4,212	-3,580	17,740944	12,816400	-15,078960	5,528	9,551	26,360			11,186										
5	238	21.08.2000	07:52	184	187 - 204	5 - 6	3D	7,4 - 2,8	33 - 10	Garmin	753,254	338458,969	150,581	-0,746	13,099	0,556516	171,583801	-9,771854	13,120	11,378	48,932			11,243										
5	239	21.08.2000	07:53	184	187 - 204	5 - 6	3D	7,4 - 2,8	33 - 10	Garmin	755,733	338455,262	150,581	1,733	9,392	3,003289	88,209664	16,276336	9,551	13,120			11,308											
5	240	21.08.2000	07:55	184	187 - 204	5 - 6	3D	7,4 - 2,8	33 - 10	Garmin	755,732	338460,822	150,581	1,732	14,952	2,999824	223,562304	25,896864	15,052	13,489			11,356											
5	250	22.08.2000	20:50	184	217 - 221	4	3D	2,5 - 3,2	11 - 24	Garmin	755,732	338457,115	173,581	1,732	11,245	2,999824	126,450025	19,476340	11,378	15,052			11,364											
5	251	22.08.2000	20:52	184	217 - 221	4	3D	2,5 - 3,2	11 - 24	Garmin	764,407	338470,089	173,582	10,407	24,219	108,305649	586,559961	252,047133	26,360	26,360			11,378											
5	252	22.08.2000	20:53	184	217 - 221	4	3D	2,5 - 3,2	11 - 24	Garmin	769,362	338492,328	173,582	15,362	46,458	235,991044	2158,345764	713,687796	48,932	48,932			11,509											
							12	0													12			11,581										
																								11,698										
Ref. 6											763,370	338455,860																			11,942			
T+G																																	11,992	
T																																		12,050
G																																		12,105
6		13.08.2000	12:00			2	keine			Trimble															12,152									
6		14.08.2000	11:55			2	keine			Trimble															12,545									
6		14.08.2000	20:45			1	keine			Trimble															13,058									
6		15.08.2000	07:35			(4)	keine	>30		Trimble														13,120										
6		16.08.2000	20:30			1	keine			Trimble														13,186										
6		17.08.2000	08:00			0	keine			Trimble											0			13,204										
							0	0																13,245										
																								13,245										
6	169	20.08.2000	07:52	184	255 - 249	4 - 5	3D	7,0 - 2,1	27 - 8	Garmin	742,101	338433,022	206,581	-21,269	-22,838	452,370361	521,574244	485,741422	31,208	1,629				13,270										
6	170	20.08.2000	07:54	184	255 - 249	4 - 5	3D	7,0 - 2,1	27 - 8	Garmin	740,862	338433,022	206,581	-22,508	-22,838	506,610064	521,574244	514,037704	32,065	4,427				13,351										
6	171	20.08.2000	07:55	184	255 - 249	4 - 5	3D	7,0 - 2,1	27 - 8	Garmin	739,623	338429,315	206,581	-23,747	-26,545	563,920009	704,637025	630,364115	35,617	5,711				13,458										
6		20.08.2000	20:40			1 - 2	keine			Garmin														13,465										
6	223	21.08.2000	07:18	184	185 - 213	5 - 6	3D	2,1 - 2,6	21 - 24	Garmin	754,494	338445,996	153,581	-8,876	-9,864	78,783376	97,298496	87,552864	13,270	7,711				13,489										
6	224	21.08.2000	07:19	184	185 - 213	5 - 6	3D	2,1 - 2,6	21 - 24	Garmin	764,408	338451,556	153,582	1,038	-4,304	1,077444	18,524416	-4,467552	4,427	13,270				13,491										
6	225	21.08.2000	07:20	184	185 - 213	5 - 6	3D	2,1 - 2,6	21 - 24	Garmin	760,691	338449,703	153,581	-2,679	-6,157	7,177041	37,908649	16,494603	6,715	31,208				13,535										
6	256	22.08.2000	21:02	184	198 - 207	4	3D	3,0 - 2,7	12	Garmin	764,408	338457,116	157,582	1,038	1,256	1,077444	1,577536	1,303728	1,629	32,065				13,541										
6	257	22.08.2000	21:04	184	198 - 207	4	3D	3,0 - 2,7	12	Garmin	756,972	338451,556	157,581	-6,398	-4,304	40,934404	18,524416	27,536992	7,711	35,617				13,593										
6	258	22.08.2000	21:05	184	198 - 207	4	3D	3,0 - 2,7	12	Garmin	758,212	338453,409	157,581	-5,158	-2,451	26,604964	6,007401	12,642258	5,711	9				13,672										
							9	0																13,837										
																								13,900										
Ref. 7											651,260	338299,010																			14,029			
T+G																																14,105		
T																																	14,151	
G																																	14,378	
7		13.08.2000	12:10			2	keine			Trimble														14,556										
7		14.08.2000	12:00			2	keine			Trimble														14,655										
7	69	14.08.2000	20:50	184		3	2D	2,5		Trimble	655,358	338297,730	138,576	4,098	-1,280	16,793604	1,638400	-5,245440	4,293	0,688	0,688			14,752										
7	70	14.08.2000	20:50	184	180	4	3D	3,9 - 4,0		Trimble	651,640	338299,583	134,576	0,380	0,573	0,144400	0,328329	0,217740	0,688	0,688	0,688			14,859										
7	71	14.08.2000	20:51	184	180	4	3D	3,9 - 4,0		Trimble	651,640	338301,436	134,576	0,380	2,426	0,144400	5,885476	0,921880	2,456	1,543	0,688			15,052										
7	72	14.08.2000	20:52	184	180	4	3D	3,9 - 4,0		Trimble	651,640	338299,583	134,576	0,380	0,573	0,144400	0,328329	0,217740	0,688	1,717	1,543			15,331										
7	112	16.08.2000	20:53	184		3	2D	2,4		Trimble	646,683	338292,170	138,576	-4,577	-6,840	20,948929	46,785600	31,306680	8,230	2,456	1,717			15,570										
7	113	16.08.2000	20:54	184		3	2D	2,4		Trimble	650,401	338292,170	138,576	-0,859	-6,840	0,737881	46,785600	5,875560	6,894	4,293	1,717			15,756										
7	114	16.08.2000	20:56	184	210	4	3D	3,5 - 3,6		Trimble	650,400	338297,729	164,576	-0,860	-1,281	0,739600	1,640961	1,101660	1,543	4,575	2,456			16,279										
7	136	17.08.2000	08:07	184		(4)	2D	8,6		Trimble	652,879	338299,583	138,576	1,619	0,573	2,621161	0,328329	0,927687	1,717	6,894	2,917			16,425										
7	137	17.08.2000	08:08	184	180	5	3D	5,7 - 5,6		Trimble	652,879	338303,289	134,576	1,619	4,279	2,621161	18,309841	6,927701	4,575	8,230	3,527			16,681										
7	138	17.08.2000	08:10	184	180	5	3D	5,7 - 5,6		Trimble	650,400	338308,849	134,576	-0,860	9,839	0,739600	96,805921	-8,461540	9,877	9,877	4,293			16,769										
							6	4													10	4,575		16,818										
																							4,762	16,859										
7	172	20.08.2000	08:02	184	196 - 203	7 - 8	3D	1,5 - 1,2	6 - 5	Garmin	650,400	338306,996	154,576	-0,860	7,986	0,739600	63,776196	-6,867960	8,032	0,688	6,192			17,079										
7	173	20.08.2000	08:03	184	196 - 203	7 - 8	3D	1,5 - 1,2	6 - 5	Garmin	651,639	338310,702	154,576	0,379	11,692	0,143641	136,702864	4,431268	11,698	1,717	6,894			17,710										
7	174	20.08.2000	08:04	184	196 - 203	7 - 8	3D	1,5 - 1,2	6 - 5	Garmin	650,400	338305,142	154,576	-0,860	6,132	0,739600	37,601424	-5,273520	6,192	2,917	8,032			18,476										
7	199	20.08.2000	20:47	184	198 - 203	4 - 5	3D	2,4 - 2,5	10	Garmin	652,879	338295,876	155,576	1,619	-3,134	2,621161	9,821956	-5,073946	3,527	3,527	8,230			18,654										
7	200	20.08.2000	20:48	184	198 - 203	4 - 5	3D	2,4 - 2,5	10	Garmin	651,640	338299,583	155,576	0,380	0,573	0,144400	0,328329	0,217740	0,688	4,762	8,976			18,786										
7	201	20.08.2000	20:49	184	198 - 203	4 - 5	3D	2,4 - 2,5	10	Garmin	652,879	338301,436	155,576	1,619	2,426	2,621161	5,885476	3,927694	2,917	6,192	9,877			18,845										
7	226	21.08.2000	07:25	184																														

Anhang 2b

Berechnung der Fehlermaße nach Stationen und Empfängern

σ_y	σ_x	q_{yx}	2Θ [°]	$\sigma_p = 1dRMS_{DS}$	2dRMS	3dRMS	CEP $_{\sigma Y,X}$	CEP $_{Daten}$	CEP95 $_{\sigma Y,X}$	CEP99 $_{\sigma Y,X}$	A	B	Θ	1dRMS $_{A,B}$	CEP $_{A,B}$	FCC67	FCC95	
0																		
Stat. 6																		
13,657	14,635	196,801	85,98	20,017	40,034	60,051	16,664	7,711	34,661	42,993	19,941	1,748	42,99	20,017	12,413	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13,657	14,635	196,801	85,98	20,017	40,034	60,051	16,664	7,711	34,661	42,993	19,941	1,748	42,99	20,017	12,413	31,208	-	
6																		
1																		
Stat. 7																		
2,305	7,771	3,638	7,53	8,106	16,211	24,317	5,935	4,575	12,345	15,312	7,786	2,253	3,76	8,106	5,745	8,230	-	
2,136	4,678	3,379	21,31	5,143	10,285	15,428	4,014	2,456	8,348	10,355	4,745	1,982	10,66	5,143	3,850	6,894	-	
2,437	9,616	3,853	5,09	9,920	19,841	29,761	7,100	6,192	14,767	18,317	9,625	2,402	2,54	9,920	6,883	8,976	15,756	
2																		

Anhang 2b

Berechnung der Fehlermaße nach Stationen und Empfängern

Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	EPE	Empfänger	GK Y [m]	GK X [m]	H orth. [m]	DY	DX	DY ²	DX ²	DY x DX	DS	DS	DS	DS	DS	DS		
7	259	22.08.2000	21:09	184	189 - 250	4 - 6	3D	3,3 - 1,7	12 - 7	Garmin	655,357	338312,555	174,577	4,097	13,545	16,785409	183,467025	55,493865	14,151	14,151	19,109			19,145		
7	260	22.08.2000	21:11	184	189 - 250	4 - 6	3D	3,3 - 1,7	12 - 7	Garmin	651,638	338318,115	174,576	0,378	19,105	0,142884	365,001025	7,221690	19,109	15,756					19,596	
7	261	22.08.2000	21:13	184	189 - 250	4 - 6	3D	3,3 - 1,7	12 - 7	Garmin	647,920	338314,408	174,576	-3,340	15,398	11,155600	237,098404	-51,429320	15,756	19,109			12		20,003	
								12	0																21,464	
																										23,452
Ref. 8											618,630	338206,440														24,174
T+G																								24,228		
T																								24,564		
G																								24,595		
8	16	13.08.2000	12:22	200	210	4	3D	5,1		Trimble	614,464	338210,625	164,574	-4,166	4,185	17,355556	17,514225	-17,434710	5,905	1,587	1,587				25,113	
8	17	13.08.2000	12:45	200		3	2D	2,6 - 2,5		Trimble	621,900	338208,772	154,574	3,270	2,332	10,692900	5,438224	7,625640	4,016	3,642	2,087				26,103	
8	18	13.08.2000	12:46	200	210	4	3D	5,9 - 5,7		Trimble	623,139	338210,625	164,574	4,509	4,185	20,331081	17,514225	18,870165	6,152	4,016	2,176				26,360	
8	19	13.08.2000	12:47	200	210	4	3D	5,5 - 5,4		Trimble	621,900	338208,772	164,574	3,270	2,332	10,692900	5,438224	7,625640	4,016	4,016	2,176				27,014	
8	20	13.08.2000	12:48	200	210	4	3D	5,3 - 5,1		Trimble	619,422	338205,065	164,574	0,792	-1,375	0,627264	1,890625	-1,089000	1,587	4,193	3,092				28,585	
8	21	13.08.2000	12:50	200	210	4	3D	5,0 - 4,9		Trimble	619,421	338210,625	164,574	0,791	4,185	0,625681	17,514225	3,310335	4,259	4,259	3,324				29,605	
8	42	14.08.2000	12:18	184	180 - 210	4	3D	5,1 - 5,0		Trimble	614,464	338205,065	164,574	-4,166	-1,375	17,355556	1,890625	5,728250	4,387	4,387	3,642				30,544	
8	43	14.08.2000	12:19	184	180 - 210	4	3D	5,1 - 5,0		Trimble	623,140	338208,772	164,574	4,510	2,332	20,340100	5,438224	10,517320	5,077	5,077	4,016				31,208	
8	44	14.08.2000	12:20	184	180 - 210	4	3D	5,1 - 5,0		Trimble	614,464	338206,918	164,574	-4,166	0,478	17,355556	0,228484	-1,991348	4,193	5,905	4,016				32,065	
8	45	14.08.2000	12:21	184	180 - 210	4	3D	5,1 - 5,0		Trimble	616,943	338203,212	164,574	-1,687	-3,228	2,845969	10,419984	5,445636	3,642	6,152	4,193				35,617	
8	76	14.08.2000	21:03	184		(4)	2D	4,6 - 4,4		Trimble	613,226	338190,239	138,574	-5,404	-16,201	29,203216	262,472401	87,550204	17,079	6,979	4,259				35,827	
8	77	14.08.2000	21:04	184		(4)	2D	4,6 - 4,4		Trimble	613,226	338188,386	138,574	-5,404	-18,054	29,203216	325,946916	97,563816	18,845	7,226	4,387				35,862	
8	78	14.08.2000	21:05	184		(4)	2D	4,6 - 4,4		Trimble	613,226	338192,093	138,574	-5,404	-14,347	29,203216	205,836409	77,531188	15,331	11,992	5,077				36,914	
8	115	16.08.2000	21:01	184		3	2D	4,1 - 4,0		Trimble	620,662	338199,506	138,574	2,032	-6,934	4,129024	48,080356	-14,089888	7,226	13,541	5,077				37,663	
8	116	16.08.2000	21:02	184		3	2D	4,1 - 4,0		Trimble	619,422	338199,506	138,574	0,792	-6,934	0,627264	48,080356	-5,491728	6,979	15,331	5,354				48,932	
8	117	16.08.2000	21:03	184		(4)	2D	3,9		Trimble	636,772	338231,012	138,575	18,142	24,572	329,132164	603,783184	445,785224	30,544	17,079	5,905				64,596	
8	142	17.08.2000	08:20	184		3	2D	6,0 - 6,1		Trimble	638,011	338236,572	138,575	19,381	30,132	375,623161	907,937424	583,988292	35,827	18,845	6,152					
8	143	17.08.2000	08:21	184	210	5	3D	5,4 - 5,0		Trimble	625,618	338218,038	164,575	6,988	11,598	48,832144	134,513604	81,046824	13,541	30,544	6,979					
8	144	17.08.2000	08:22	184	210	5	3D	5,4 - 5,0		Trimble	625,618	338216,185	164,575	6,988	9,745	48,832144	94,965025	68,098060	11,992	35,827	7,123					
								11	8																	19
																										7,226
																										9,089
8	175	20.08.2000	08:07	184	190 - 197	6 - 7	3D	1,8 - 1,7	7	Garmin	619,422	338203,212	148,574	0,792	-3,228	0,627264	10,419984	-2,556576	3,324	2,087	11,036					
8	176	20.08.2000	08:08	184	190 - 197	6 - 7	3D	1,8 - 1,7	7	Garmin	616,943	338205,065	148,574	-1,687	-1,375	2,845969	1,890625	2,319625	2,176	2,176	11,992					
8	177	20.08.2000	08:09	184	190 - 197	6 - 7	3D	1,8 - 1,7	7	Garmin	616,943	338205,065	148,574	-1,687	-1,375	2,845969	1,890625	2,319625	2,176	2,176	13,541					
8	202	20.08.2000	20:54	184	190 - 224	4 - 6	3D	3,7 - 1,8	15 - 9	Garmin	628,096	338223,598	161,575	9,466	17,158	89,605156	294,396964	162,417628	19,596	3,092	15,331					
8	203	20.08.2000	20:56	184	190 - 224	4 - 6	3D	3,7 - 1,8	15 - 9	Garmin	623,139	338214,332	161,575	4,509	7,892	20,331081	62,283664	35,585028	9,089	3,324	17,079					
8	204	20.08.2000	20:57	184	190 - 224	4 - 6	3D	3,7 - 1,8	15 - 9	Garmin	623,140	338208,772	161,574	4,510	2,332	20,340100	5,438224	10,517320	5,077	5,077	18,845					
8	229	21.08.2000	07:31	184	183 - 221	6 - 7	3D	2,7 - 1,9	25 - 6	Garmin	616,943	338201,359	156,574	-1,687	-5,081	2,845969	25,816561	8,571647	5,354	5,354	19,596					
8	230	21.08.2000	07:32	184	183 - 221	6 - 7	3D	2,7 - 1,9	25 - 6	Garmin	615,704	338195,799	156,574	-2,926	-10,641	8,561476	113,230881	31,135566	11,036	7,123	21,464					
8	231	21.08.2000	07:33	184	183 - 221	6 - 7	3D	2,7 - 1,9	25 - 6	Garmin	604,550	338190,239	156,574	-14,080	-16,201	198,246400	262,472401	228,110080	21,464	9,089	30,544					
8	265	24.08.2000	20:39	184	197 - 187	5 - 7	3D	1,2 - 1,6	5	Garmin	620,661	338206,919	146,574	2,031	0,479	4,124961	0,229441	0,972849	2,087	11,036	35,827					
8	266	24.08.2000	20:40	184	197 - 187	5 - 7	3D	1,2 - 1,6	5	Garmin	625,619	338205,066	146,575	6,989	-1,374	48,846121	1,887876	-9,602886	7,123	19,596						
8	267	24.08.2000	20:41	184	197 - 187	5 - 7	3D	1,2 - 1,6	5	Garmin	620,661	338208,772	146,574	2,031	2,332	4,124961	5,438224	4,736292	3,092	21,464						
								12	0																	12
Ref. 9											823,460	338312,630														
T+G																										
T																										
G																										
9	22	13.08.2000	12:59	200		3	2D	6,2 - 7,4		Trimble	818,950	338319,981	154,582	-4,510	7,351	20,340100	54,037201	-33,153010	8,624	2,928	2,553					
9	23	13.08.2000	13:00	200		3	2D	6,2 - 7,4		Trimble	813,993	338321,834	154,582	-9,467	9,204	89,624089	84,713616	-87,134268	13,204	4,018	2,928					
9	24	13.08.2000	13:02	200		3	2D	6,2 - 7,4		Trimble	826,387	338316,275	154,583	2,927	3,645	8,567329	13,286025	10,668915	4,675	4,675	4,018					
9	46	14.08.2000	12:27	184		3	2D	2,2		Trimble	826,387	338312,569	138,582	2,927	-0,061	8,567329	0,003721	-0,178547	2,928	5,676	4,675					
9	47	14.08.2000	12:28	1																						

Anhang 2b

Berechnung der Fehlermaße nach Stationen und Empfängern

σ_y	σ_x	q_{yx}	$2\Theta [^\circ]$	$\sigma_p = 1dRMS_{DS}$	2dRMS	3dRMS	CEP $_{\sigma_{Y,X}}$	CEP $_{Daten}$	CEP95 $_{\sigma_{Y,X}}$	CEP99 $_{\sigma_{Y,X}}$	A	B	Θ	1dRMS $_{A,B}$	CEP $_{A,B}$	FCC67	FCC95	
0																		
Stat. 8																		
6,759	10,626	62,423	61,70	12,594	25,187	37,781	10,240	5,905	21,299	26,419	12,256	2,899	30,85	12,594	8,673	9,089	21,464	
7,302	11,954	76,873	59,77	14,007	28,015	42,022	11,341	6,152	23,590	29,261	13,677	3,022	29,89	14,007	9,557	11,992	30,544	
5,798	8,090	39,544	68,07	9,953	19,906	29,859	8,180	5,077	17,014	21,104	9,600	2,627	34,04	9,953	6,998	7,123	19,596	
0																		
0																		
Stat. 9																		
7,891	8,482	-27,776	-80,12	11,585	23,170	34,755	9,644	9,332	20,059	24,881	9,762	6,238	166,11	11,585	9,157	11,243	23,452	
6,022	7,377	-15,434	-59,54	9,522	19,045	28,567	7,892	8,046	16,414	20,360	7,953	5,237	172,28	9,522	7,549	9,332	13,204	
9,956	9,837	-45,260	-91,49	13,996	27,992	41,989	11,658	11,186	24,249	30,078	11,968	7,258	157,37	13,996	11,003	11,364	23,452	

Anhang 2b

Berechnung der Fehlermaße nach Stationen und Empfängern

Station	L.Nr.	Datum	Uhrzeit	H a priori	H gem.	Anz. Sat.	Lösung	DOP	EPE	Empfänger	GK Y [m]	GK X [m]	H orth. [m]	DY	DX	DY ²	DX ²	DY x DX	DS	DS	DS	DS	DS	DS		
9	146	17.08.2000	08:29	184		(5)	2D	2,8 - 2,7		Trimble	820,190	338319,981	138,582	-3,270	7,351	10,692900	54,037201	-24,037770	8,046	13,204	9,776					
9	147	17.08.2000	08:31	184		(5)	2D	2,8 - 2,7		Trimble	842,499	338312,570	138,583	19,039	-0,060	362,483521	0,003600	-1,142340	19,039	19,039	11,086					
							4	13													17					
																								11,243		
9	178	20.08.2000	08:14	184	192 - 247	6 - 8	3D	3,0 - 1,3	12 - 5	Garmin	846,218	338303,304	174,583	22,758	-9,326	517,926564	86,974276	-212,241108	24,595	2,553	11,308					
9	179	20.08.2000	08:16	184	192 - 247	6 - 8	3D	3,0 - 1,3	12 - 5	Garmin	844,978	338303,304	174,583	21,518	-9,326	463,024324	86,974276	-200,676868	23,452	5,869	11,364					
9	180	20.08.2000	08:17	184	192 - 247	6 - 8	3D	3,0 - 1,3	12 - 5	Garmin	836,303	338305,157	174,583	12,843	-7,473	164,942649	55,845729	-95,975739	14,859	6,338	11,942					
9	205	20.08.2000	21:02	184	202 - 210		4	3D	3,3 - 3,5	14 - 15	Garmin	825,147	338323,688	160,583	1,687	11,058	2,845969	122,279364	18,654846	11,186	6,997	13,058				
9	206	20.08.2000	21:03	184	202 - 210		4	3D	3,3 - 3,5	14 - 15	Garmin	823,907	338331,101	160,583	0,447	18,471	0,199809	341,177841	8,256537	18,476	11,086	13,204				
9	207	20.08.2000	21:04	184	202 - 210		4	3D	3,3 - 3,5	14 - 15	Garmin	822,668	338323,688	160,582	-0,792	11,058	0,627264	122,279364	-8,757936	11,086	11,186	14,859				
9	232	21.08.2000	07:38	184	213 - 181	6 - 7	3D	2,0 - 3,7	7 - 20	Garmin	821,431	338301,449	151,582	-2,029	-11,181	4,116841	125,014761	22,686249	11,364	11,243	18,476					
9	233	21.08.2000	07:39	184	213 - 181	6 - 7	3D	2,0 - 3,7	7 - 20	Garmin	825,148	338307,009	151,582	1,688	-5,621	2,849344	31,595641	-9,488248	5,869	11,364	19,039					
9	234	21.08.2000	07:40	184	213 - 181	6 - 7	3D	2,0 - 3,7	7 - 20	Garmin	827,627	338307,009	151,582	4,167	-5,621	17,363889	31,595641	-23,422707	6,997	14,859	23,452					
9	268	24.08.2000	20:45	184	200 - 206	4	3D	3,3 - 3,5	14	Garmin	821,429	338323,688	157,582	-2,031	11,058	4,124961	122,279364	-22,458798	11,243	18,476	24,595					
9	269	24.08.2000	20:46	184	200 - 206	4	3D	3,3 - 3,5	14	Garmin	825,148	338310,715	157,582	1,688	-1,915	2,849344	3,667225	-3,232520	2,553	23,452						
9	270	24.08.2000	20:47	184	200 - 206	4	3D	3,3 - 3,5	14	Garmin	826,388	338307,009	157,582	2,928	-5,621	8,573184	31,595641	-16,458288	6,338	24,595						
							12	0																12		
Ref. 10											758,120	338255,540														
T+G																										
T																										
G																										
10	25	13.08.2000	13:07	200		3	2D	8,9 - 8,0		Trimble	742,111	338318,121	154,580	-16,009	62,581	256,288081	3916,381561	-1001,859229	64,596	1,821	1,821					
10	26	13.08.2000	13:08	200		3	2D	8,9 - 8,0		Trimble	756,988	338256,966	154,580	-1,132	1,426	1,281424	2,033476	-1,614232	1,821	1,962	1,821					
10	27	13.08.2000	13:09	200		3	2D	8,9 - 8,0		Trimble	758,227	338268,085	154,580	0,107	12,545	0,011449	157,377025	1,342315	12,545	4,135	1,962					
10	51	14.08.2000	12:34	184		3	2D	3,1		Trimble	769,381	338268,086	138,580	11,261	12,546	126,810121	157,402116	141,280506	16,859	4,766	2,767					
10	52	14.08.2000	12:36	184	210	4	3D	3		Trimble	759,467	338256,966	164,580	1,347	1,426	1,814409	2,033476	1,920822	1,962	5,133	3,545					
10	53	14.08.2000	12:36	184	180	4	3D	3		Trimble	768,142	338266,233	134,580	10,022	10,693	100,440484	114,340249	107,165246	14,655	5,488	4,135					
10	54	14.08.2000	12:38	184	180	4	3D	3		Trimble	765,663	338262,526	134,580	7,543	6,986	56,896849	48,804196	52,695398	10,281	6,401	4,766					
10	82	14.08.2000	21:16	184		3	2D	2,5 - 2,6		Trimble	754,510	338251,406	138,579	-3,610	-4,134	13,032100	17,089956	14,923740	5,488	7,675	5,133					
10	83	14.08.2000	21:17	184		3	2D	2,5 - 2,6		Trimble	750,792	338245,846	138,579	-7,328	-9,694	53,699584	93,973636	71,037632	12,152	8,840	5,488					
10	84	14.08.2000	21:19	184		3	2D	2,5 - 2,6		Trimble	750,792	338253,259	138,579	-7,328	-2,281	53,699584	5,202961	16,715168	7,675	10,281	6,275					
10	121	16.08.2000	21:24	184	180	4	3D	4,6 - 4,5		Trimble	758,227	338264,379	134,580	0,107	8,839	0,011449	78,127921	0,945773	8,840	10,733	6,401					
10	122	16.08.2000	21:26	184	180	4	3D	4,6 - 4,5		Trimble	752,030	338264,378	134,579	-6,090	8,838	37,088100	78,110244	-53,823420	10,733	12,152	6,987					
10	123	16.08.2000	21:28	184		3	2D	3		Trimble	758,227	338260,672	138,580	0,107	5,132	0,011449	26,337424	0,549124	5,133	12,545	7,377					
10	148	17.08.2000	08:34	184	210	5	3D	4,4		Trimble	755,749	338251,406	164,579	-2,371	-4,134	5,621641	17,089956	9,801714	4,766	14,655	7,675					
10	149	17.08.2000	08:36	184	180	5	3D	4,2		Trimble	761,945	338260,673	134,580	3,825	5,133	14,630625	26,347689	19,633725	6,401	16,859	7,841					
10	150	17.08.2000	08:37	184	180	5	3D	4,2		Trimble	758,228	338251,406	134,580	0,108	-4,134	0,011664	17,089956	-0,446472	4,135	64,596	7,965					
							8	8																16		
																									9,152	
10	181	20.08.2000	08:20	184	196 - 200	6 - 7	3D	1,4 - 1,6	5 - 6	Garmin	754,509	338260,672	152,579	-3,611	5,132	13,039321	26,337424	-18,531652	6,275	1,821	10,281					
10	182	20.08.2000	08:22	184	196 - 200	6 - 7	3D	1,4 - 1,6	5 - 6	Garmin	756,988	338256,966	152,580	-1,132	1,426	1,281424	2,033476	-1,614232	1,821	2,767	10,733					
10	183	20.08.2000	08:23	184	196 - 200	6 - 7	3D	1,4 - 1,6	5 - 6	Garmin	755,749	338256,966	152,580	-2,371	1,426	5,621641	2,033476	-3,381046	2,767	3,545	10,952					
10	208	20.08.2000	21:07	184	184 - 208	4 - 5	3D	2,9 - 2,0	12 - 8	Garmin	761,945	338266,232	150,580	3,825	10,692	14,630625	114,318864	40,896900	11,356	6,275	11,356					
10	209	20.08.2000	21:08	184	184 - 208	4 - 5	3D	2,9 - 2,0	12 - 8	Garmin	759,465	338275,498	150,580	1,345	19,958	1,809025	398,321764	26,843510	20,003	6,987	12,152					
10	210	20.08.2000	21:10	184	184 - 208	4 - 5	3D	2,9 - 2,0	12 - 8	Garmin	761,945	338262,526	150,580	3,825	6,986	14,630625	48,804196	26,721450	7,965	7,377	12,545					
10	235	21.08.2000	07:43	184	189 - 192	6 - 7	3D	3,5 - 1,3	14 - 5	Garmin	755,748	338262,525	145,580	-2,372	6,985	5,626384	48,790225	-16,568420	7,377	7,841	14,655					
10	236	21.08.2000	07:45	184	189 - 192	6 - 7	3D	3,5 - 1,3	14 - 5	Garmin	759,467	338258,819	145,580	1,347	3,279	1,814409	10,751841	4,416813	3,545	7,965	16,859					
10	237	21.08.2000	07:46	184	189 - 192	6 - 7	3D	3,5 - 1,3	14 - 5	Garmin	758,227	338262,526	145,580	0,107	6,986	0,011449	48,804196	0,747502	6,987	9,152	20,003					
10	271	24.08.2000	20:51	184	189 - 205	4 - 6	3D	2,9 - 2,0	12 - 8	Garmin	758,228	338247,700	151,580	0,108	-7,840	0,011664	61,465600	-0,846720	7,841	10,952	64,596					
10	272	24.08.2000	20:52	184	189 - 205	4 - 6	3D	2,9 - 2,0	12 - 8	Garmin	755,748	338266,232	151,580	-2,372	10,692	5,626384	114,318864	-25,361424								

Anhang 2c

Ergebnisse im Überblick

Station	Empfänger	Anz. Ergebnisse	Anz. Fehlschläge	Anz. 3D	Anz. 2D	σ_Y 68,3%	σ_X 68,3%	$\sigma_P = 1dRMS_{DS}$ 63 - 68%	2dRMS 95 - 98%	3dRMS 99,9%	CEP _{oY,X} 50%	CEP95 _{oY,X} 95%	CEP99 _{oY,X} 99%	CEP _{Daten} 50%	FCC67 67%	FCC95 95%
1	Trimble	30	2	14	16	8,8	11,0	14,1	28,2	42,3	11,7	24,3	30,1	9,8	12,1	36,9
	Garmin	18	0	18	0	4,6	10,6	11,5	23,1	34,6	9,0	18,6	23,1	5,9	6,7	19,1
	Gesamt	48	2	32	16	7,5	10,8	13,2	26,4	39,6	10,8	22,5	27,9	7,4	10,9	36,9
2	Trimble	15	1	8	7	3,1	10,8	11,3	22,6	33,8	8,2	17,1	21,2	10,2	13,5	19,1
	Garmin	12	0	12	0	2,1	6,2	6,6	13,2	19,7	4,9	10,3	12,7	4,2	4,2	6,1
	Gesamt	27	1	20	7	2,7	9,1	9,5	19,0	28,5	7,0	14,5	18,0	5,4	10,2	19,1
3	Trimble	18	0	11	7	5,2	14,1	15,1	30,1	45,2	11,4	23,7	29,3	11,1	13,2	28,6
	Garmin	12	0	12	0	5,2	13,2	14,2	28,4	42,6	10,8	22,6	28,0	3,9	6,5	24,2
	Gesamt	30	0	23	7	5,2	13,8	14,7	29,4	44,2	11,2	23,2	28,8	8,7	13,2	29,6
4	Trimble	15	1	10	5	6,0	10,0	11,7	23,4	35,1	9,5	19,7	24,4	10,6	12,1	26,1
	Garmin	12	0	12	0	2,8	7,7	8,2	16,4	24,7	6,2	12,9	16,0	2,3	7,6	13,9
	Gesamt	27	1	22	5	4,8	9,3	10,5	21,0	31,5	8,3	17,3	21,5	7,3	11,5	26,1
5	Trimble	9	3	0	9	2,4	8,1	8,5	16,9	25,4	6,2	12,9	16,0	7,3	9,9	-
	Garmin	12	0	12	0	6,3	17,3	18,4	36,8	55,2	13,9	28,9	35,8	9,6	13,1	26,4
	Gesamt	21	3	12	9	5,0	14,1	15,0	29,9	44,9	11,2	23,4	29,0	7,6	13,1	-
6	Trimble	0	6	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Garmin	9	1	9	0	13,7	14,6	20,0	40,0	60,1	16,7	34,7	43,0	7,7	31,2	-
	Gesamt	9	7	9	0	13,7	14,6	20,0	40,0	60,1	16,7	34,7	43,0	7,7	-	-
7	Trimble	10	2	6	4	2,1	4,7	5,1	10,3	15,4	4,0	8,3	10,4	2,5	6,9	-
	Garmin	12	0	12	0	2,4	9,6	9,9	19,8	29,8	7,1	14,8	18,3	6,2	9,0	15,8
	Gesamt	22	2	18	4	2,3	7,8	8,1	16,2	24,3	5,9	12,3	15,3	4,6	8,2	-
8	Trimble	19	0	11	8	7,3	12,0	14,0	28,0	42,0	11,3	23,6	29,3	6,2	12,0	30,5
	Garmin	12	0	12	0	5,8	8,1	10,0	19,9	29,9	8,2	17,0	21,1	5,1	7,1	19,6
	Gesamt	31	0	23	8	6,8	10,6	12,6	25,2	37,8	10,2	21,3	26,4	5,9	9,1	21,5
9	Trimble	17	0	4	13	6,0	7,4	9,5	19,0	28,6	7,9	16,4	20,4	8,0	9,3	13,2
	Garmin	12	0	12	0	10,0	9,8	14,0	28,0	42,0	11,7	24,2	30,1	11,2	11,4	23,5
	Gesamt	29	0	16	13	7,9	8,5	11,6	23,2	34,8	9,6	20,1	24,9	9,3	11,2	23,5
10	Trimble	16	0	8	8	6,7	17,2	18,5	37,0	55,5	14,1	29,4	36,4	7,7	10,7	16,9
	Garmin	12	0	12	0	2,4	8,9	9,2	18,5	27,7	6,7	13,9	17,2	7,4	8,0	11,4
	Gesamt	28	0	20	8	5,3	14,3	15,2	30,5	45,7	11,5	24,0	29,8	7,7	10,3	20,0
Gesamt Trimble		149	15	72	77	6,3	11,5	13,1	26,3	39,4	10,5	21,8	27,1	8,7	13,2	-
Gesamt Garmin		123	1	123	0	6,2	11,0	12,6	25,2	37,8	10,1	21,0	26,1	6,3	9,6	31,2
Gesamt T+G		272	16	195	77	6,3	11,3	12,9	25,8	38,7	10,3	21,5	26,6	7,3	11,4	-