

Nr. 247

**Zur Kalibrierung  
der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen  
für die hochpräzise Positionsbestimmung**

Vom Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades

**DOKTOR - INGENIEUR**

genehmigte Dissertation  
von  
Dipl.-Ing. Falko Menge

HANNOVER 2003

---

Referent: Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. James Campbell

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Mai 2003

## Zusammenfassung

Die erheblichen Genauigkeitssteigerungen im Bereich der hochpräzisen Positionsbestimmung mit Trägerphasenbeobachtungen des Global Positioning Systems (GPS), speziell der entfernungsabhängigen Fehleranteile, haben eine Fokussierung auf die stationsabhängigen Effekte notwendig gemacht. Vor allem für zuverlässige Genauigkeiten im Millimeter-Bereich bei Kurzzeitanwendungen ist die Bestimmung dieser systematischen Fehleranteile unerlässlich. Neben Fehlern durch die Mehrwegeausbreitung sind die Phasenzentrumsvariationen der Antennen von entscheidender Bedeutung. Ihre Vernachlässigung kann in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung zu Auswirkungen speziell für die Höhenkomponente von bis zu mehreren Zentimetern führen.

Eine Betrachtung der Konstruktion einer GPS-Antenne aus elektrotechnischer Sicht zeigt die Komplexität des Empfangs- bzw. Sendeverhaltens. Abweichend von einem theoretischen Kugelstrahler ergeben sich die unterschiedlichsten Phasen(zentrums)variationen (PCV). Für deren Kalibrierung bzw. Prüfung stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, beispielsweise diverse Möglichkeiten für die ledigliche Bestimmung eines mittleren Offsets, die absolute Kammerkalibrierung und die relative Feldkalibrierung. Mit dem Ziel der Vermeidung von bestimmten Abhängigkeiten und Restfehlern der vorhandenen Modelle wurde die Absolute Feldkalibrierung entwickelt, was zu einem operationellen Echtzeitverfahren mit der Nutzung eines Roboters führt. „Absolut“ bezeichnet dabei die Unabhängigkeit von einer Referenzantenne. Wiederholungsmessungen und Vergleiche mit Ergebnissen anderer Kalibrierungsmethoden zeigen, dass dieses Verfahren hochauflösende, stationsunabhängige PCV bis zum Antennenhorizont liefert. Dadurch werden präzise Untersuchungen der PCV verschiedener Antennentypen möglich, welche die Auswirkungen verschiedener Konstruktionsformen auf die PCV zeigen. Es können speziell starke Veränderungen durch Gehäuse, Grundplatte und Dome-Konstruktion gezeigt werden. Das Verfahren belegt zudem das Auftreten signifikanter azimuthaler PCV und Differenzen zwischen Typ- und Individualkalibrierung.

Die Größenordnungen der PCV und die Genauigkeit einer Kalibrierung machen theoretisch und praktisch deutlich, dass für eine hochpräzise Positionsbestimmung ihre Kenntnis auf dem Niveau  $\leq 1$  mm erforderlich ist. In Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung ergeben sich unterschiedliche Effekte für die Positions- und Mehrdeutigkeitslösung. Vorteile für die Absolute Feldkalibrierung ergeben sich vor allem für Kurzzeitbeobachtungen, bei denen nur ein begrenzter Ausschnitt der Satellitenkonstellation genutzt werden kann. Aber auch speziell im Zusammenhang mit einer Fehlerverstärkung durch die Troposphärenmodellierung ergibt sich die Forderung nach sehr präzisen Korrekturmodellen. Ein Absolutmodell ist immer erforderlich, wenn die Antennen eines Netzes Differenzen und Veränderungen in ihrer Orientierung zueinander aufweisen. Dies ist in bewegten lokalen Vermessungen genauso der Fall wie in der Auswertung globaler Netze. Die Betrachtung regionaler bzw. globaler Anwendungen (Referenznetze, Simulationen) macht deutlich, dass das Modell absoluter PCV-Korrekturen richtig ist, obwohl im Vergleich zu Lösungen anderer Raumverfahren ein Netzmaßstab nach ihrer Einführung auftritt. Es zeigt sich, dass die mangelnde genaue Kenntnis des Antennenverhaltens am Satellit Auslöser ist. Mit den vorhandenen präzisen PCV-Korrekturen ergeben sich weitere Bereiche für zukünftigen Forschungsbedarf. Dazu zählt u.a. die Umsetzung und operationelle Anwendung des Absolutmodells und als nächster Schritt besonders die Lösung des zweiten stationsabhängigen Fehlers der Mehrwegeausbreitung.

*Schlagwörter: Global Positioning System (GPS), Präzise Positionsbestimmung, Phasenzentrumsvariationen (PCV), GPS-Antennen, Antennenkalibrierung, Absolute Feldkalibrierung.*

## Summary

The considerably increasing accuracies especially for the distance dependent errors in the field of highly precise position determination using the phase observation of the Global Positioning System (GPS) require to focus on the station dependent effects. Reliable accuracies in the range of millimetres especially for short-time applications demand the consideration of these systematic residual effects. Beside the errors due to multipath, the phase center variations of the antennas are significantly important. In dependence of the application, a disregard for the PCV will lead to errors of up to several centimeters in the position domain. This is especially valid for the height component.

An electrotechnical view on the construction of a GPS-antenna reveals the complexity of its behavior concerning transmission and reception respectively. There arise phase (center) variations (PCV) in difference to a theoretical point source. There are different methods available for a calibration or only verification, for example several possibilities for the mere determination of mean offsets, the absolute chamber and the relative field calibration. In order to avoid certain dependencies and remaining errors, the absolute field calibration was evolving, which leads to an operational real-time procedure using a robot. In this case, the expression “absolute“ means the independence of a reference antenna. Repeated calibrations and comparisons with the results of other procedures show, that this method yields station independent PCV down to the antenna’s horizon with high resolution. This allows to precisely analyse the possible effects of diverse construction forms on the PCV. Especially strong variations due to the enclosure, groundplane and dome construction can be shown, as well as the presence of significant azimuthal PCV and differences between type and individual calibrations.

Looking at the range of the PCV and the calibration accuracies theoretically and practically, it is obvious to demand precise corrections of  $\leq 1$  mm for highly precise position determination. In dependence of the kind of application, different effects on the position and ambiguity solution can be expected. We see advantages for the absolute field calibration mainly for short time observations, where only a limited part of the satellite constellation can be used. The necessity of precise PCV corrections becomes obvious especially in connection with the error amplification through tropospheric modeling. One always needs an absolute model in case of networks with differently orientated antennas, which is valid for kinematic local surveyings as well as for the processing of global networks. Examinations of regional or global applications (reference networks, simulations) show the correctness of the absolute model, in spite of an arising scale error in comparison to solutions of other space techniques while introducing these PCV. It becomes clear, that the deficient knowledge of the antenna behavior of the satellite causes this effect. Future fields of research are visible with the availability of precise PCV, among other things the realization and operational use of the absolute model. Furthermore, the next step will be the solution for the second station dependent error multipath.

*Key Words: Global Positioning System (GPS), Precise Position Determination, Phase Center Variations (PCV), GPS-Antennas, Antenna Calibration, Absolute Field Calibration.*



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Ziele</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Entwicklungen und Anwendungen des Global Positioning System GPS</b>	<b>4</b>
2.1	Funktion, Aufbau und Entwicklungen des GPS und zukünftigen GNSS . . . . .	5
2.2	Potential für präzise GPS-Anwendungen . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Grundlagen und Stand der präzisen Positionsbestimmung mit GPS</b>	<b>15</b>
3.1	GPS-Beobachtungsmodell . . . . .	15
3.2	Das Fehlerbudget von GPS . . . . .	20
3.2.1	Entfernungsabhängige Fehler . . . . .	21
3.2.2	Stationsabhängige Fehler . . . . .	26
3.3	Anmerkungen zur präzisen GPS-Höhenbestimmung . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Beschreibung von GPS-Antennen</b>	<b>33</b>
4.1	Wellentheorie elektromagnetischer Felder . . . . .	33
4.2	Aufgaben und Charakteristika von Antennen . . . . .	39
4.2.1	Definition und Aufgabe einer Antenne . . . . .	39
4.2.2	Eigenschaften von Antennen . . . . .	42
4.2.3	Antennentypen . . . . .	47
4.3	Exkurs: Leistungsbilanz Funkverbindung Satellit-Empfänger . . . . .	53
4.4	Beschreibung des Empfangsverhaltens von GPS-Antennen . . . . .	56
4.4.1	Allgemeine Charakteristika von GPS-Antennen . . . . .	56
4.4.2	Beschreibung der Phasenzentrumsvariationen . . . . .	60
4.5	Anforderungen für hochpräzise Messungen . . . . .	65

<b>5</b>	<b>Kalibrierung von GPS-Antennen</b>	<b>70</b>
5.1	Antennenprüfung - Reine Offsetbestimmung . . . . .	71
5.2	Relative Kalibrierung von GPS-Antennen . . . . .	78
5.3	Absolute Kammerkalibrierung von GPS-Antennen . . . . .	81
5.4	Absolute Feldkalibrierung von GPS-Antennen . . . . .	84
5.4.1	Grundlagen des Verfahrens - Post-Processing . . . . .	85
5.4.2	Weiterentwicklungen - Automatisierung und Echtzeitverfahren . . . . .	92
5.4.3	Anmerkungen zur Nutzung eines Roboters . . . . .	98
<b>6</b>	<b>Aspekte und Vergleiche verschiedener Kalibrierungsarten</b>	<b>104</b>
6.1	Zur Genauigkeit der absoluten Feldkalibrierung . . . . .	104
6.2	Umrechnung Relativ- und Absolutniveau - Diskussion Nullantenne . . . . .	113
6.3	Relativ- und Absolutkalibrierungen - Unterschiede und Vergleiche . . . . .	119
6.4	Ein Vergleich absoluter PCV aus Kammer- und Feldkalibrierung . . . . .	127
<b>7</b>	<b>Untersuchungen zu Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen</b>	<b>130</b>
7.1	Phasenzentrumsvariationen von Rover-Antennen und azimutale PCV . . . . .	130
7.2	Einfluss einer Grundplatte auf die PCV . . . . .	134
7.3	Einfluss einer Dome-Konstruktion auf die PCV . . . . .	138
7.4	Bemerkungen zu speziellen Antennentypen, Typ- und Individualkalibrierung . . .	141
<b>8</b>	<b>Einfluss der PCV auf die präzise GPS-Auswertung</b>	<b>147</b>
8.1	Übersicht über Auswirkungen von PCV in verschiedenen Anwendungen . . . . .	147
8.1.1	Exkurs: Antennenorientierung und Phasenmessung . . . . .	150
8.2	Lokale Anwendungen . . . . .	152
8.2.1	Kurze gemischte Basislinien . . . . .	153
8.2.2	Kurzzeitbeobachtung, Kinematik, verkippte Antennen . . . . .	155
8.3	Regionale und großräumige Anwendungen . . . . .	159
8.3.1	PCV und Troposphärenparameter - Auswirkung, Beispiele . . . . .	160
8.3.2	Anmerkungen zur Mehrdeutigkeitsproblematik und PCV . . . . .	164
8.3.3	Absolute PCV - Netzmaßstab, Troposphäre, Satelliten-PCV . . . . .	167
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>176</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>181</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Entwicklungen von GPS/GNSS . . . . .	7
2.2	Zusammenstellung der Arten der GPS-Positionierung und der genauigkeitsrelevanten Einflussfaktoren der Auswertung . . . . .	11
2.3	Beispiele für Entwicklungen des GPS-Systems, präziser GPS-Anwendungen, ihrer Zusammenhänge und Abhängigkeiten. . . . .	13
4.1	Momentaufnahme der Ausbreitung eines elektromagnetischen Feldes (nach <i>Langley 1999</i> ). . . . .	37
4.2	Darstellung der zeitlichen Variation des elektrischen Feldvektors einer rechtshändig zirkular polarisierten Welle an einem bestimmten Ort ( <i>Langley 1999</i> ). . . . .	39
4.3	Abstrahlung der EM-Welle. Antenne als Übergangstruktur zwischen leitungsgebundener Welle und Freiraumwelle. . . . .	40
4.4	Definition von Nah- und Fernfeld einer Antenne. . . . .	41
4.5	Beispiel für Diagramm einer Richtantenne (Vertikales Leistungsdiagramm, kartesisch). Kugelkoordinatensystem mit Hauptstrahlrichtung bei $\theta = 0$ . . . . .	45
4.6	Beispiel für grundsätzlichen Aufbau einer Microstrip-Antenne (rechteckiger Patch). . . . .	50
4.7	Beispiele möglicher Konstruktionsformen für zirkular polarisierte Microstrip-Antennen (nach <i>James und Hall 1989</i> und <i>Balanis 1997</i> ). . . . .	51
4.8	GPS-Leistungsbilanz zwischen Satellit und Nutzer. . . . .	55
4.9	Verschiedene für den GPS-Einsatz genutzte Antennentypen. . . . .	56
4.10	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise eines Choke Rings (nach <i>Filippov u.a. 1998</i> ). . . . .	59
4.11	Beschreibung der Phasenzentrumsvariationen PCV. . . . .	61
4.12	Phasenzentrumsvariationen und Phasenvariationen. Ideale und reale Wellenfront gleicher Phase. . . . .	62
4.13	Wahl des Bezugspunktes und zugehörige PCV. Beispiel AOAD/ $M_T$ , L1-Signal, nur Veränderungen des Höhenbezugs. . . . .	64
4.14	Beispiele für durch Lage-Offsets beschriebene PCV. . . . .	65
4.15	Abschätzung der Genauigkeit der Positionsbestimmung einer einzelnen Messepoche auf Grund der Genauigkeit der eingeführten PCV-Korrekturen. . . . .	68

5.1	Offsetbestimmung auf bekannter Basis. . . . .	72
5.2	Offsetbestimmung durch Antennentausch. . . . .	73
5.3	Offsetbestimmung durch Antennenrotation. . . . .	73
5.4	Einflussfaktoren und Unterschiede auf die Offsetbestimmung. . . . .	74
5.5	Abhängigkeit des Höhenoffsets von gewählter Elevationsmaske. . . . .	75
5.6	Abhängigkeit der Offset-Genauigkeit von PCV-Topographie. Auswirkung Minimumsbedingung (PCV $\rightarrow$ min) der Offsetbestimmung bei Absoluter Feldkalibrierung. . . . .	76
5.7	Wiederholbarkeit der Offsetbestimmung mit dem Verfahren der Absoluten Feldkalibrierung. . . . .	77
5.8	Prinzipieller Messungsaufbau bei relativer Feldkalibrierung nach <i>Mader (1999)</i> . . . . .	80
5.9	Prinzipieller Messungsaufbau der Kammerkalibrierung nach <i>Bartels (1995)</i> . . . . .	82
5.10	Absolute PCV der AOAD/M_T ( $L_1, L_2$ ) aus Kammermessungen, NASA GSFC. . . . .	84
5.11	Differenz zwischen Umlaufzeiten ( $2 \cdot 12$ h) einzelner Satelliten und einem mittleren Sonnentag. . . . .	86
5.12	Elimination/Reduktion von Mehrwegeeffekten durch Tagesdifferenzen. . . . .	87
5.13	Kreuzkorrelation DD-Residuen aufeinander folgender Tage für verschiedene Satellitenkombinationen. . . . .	87
5.14	Verwendete Unterbau-Versionen im Post-Processing-Verfahren. . . . .	90
5.15	Geringe Veränderung der Mehrwegefehler durch unterschiedliche Reflektoreigenschaften (Nässe). . . . .	91
5.16	Roboter mit fünf Freiheitsgraden/Modulen. . . . .	93
5.17	Wirkung Dreifacher Differenzen (TD) zur Veranschaulichung der Weiterentwicklung zur Elimination von Mehrwegefehlern in Echtzeit. . . . .	94
5.18	Abdeckung der Antennenhemisphäre mit Beobachtungen bei statischer 24h-Messung und bei absoluter Feldkalibrierung in Echtzeit. . . . .	95
5.19	Abdeckung der Antennenhemisphäre mit Beobachtungen. Klassenhäufigkeiten bei statischer 24h-Messung und bei absoluter Feldkalibrierung in Echtzeit für $1^\circ \times 1^\circ$ -Klassen. . . . .	95
5.20	Prinzip der dynamischen Elevationsmaske der Absoluten Feldkalibrierung (Roboter). . . . .	96
5.21	Veränderung Elevationsmaske (im Antennensystem) zur Nutzung von Satellitensignalen unterhalb der Grundplatte. . . . .	97
5.22	Stetigkeitstest. Empfang von Daten oberhalb und unterhalb der Grundplatte. . . . .	97
5.23	Kalibrierung Roboter und Übernahme in Feldmessung. . . . .	101
6.1	Vergleich der PCV aus alter Kalibrierung (Unterbau, Tagesdifferenz, manuelle Bedienung) bezüglich Echtzeitergebnissen mit Roboter. . . . .	106

6.2	Vergleich der PCV-Ergebnisse aus Post-Processing und Echtzeitkalibrierung (identische Beobachtungsdaten, Roboter). . . . .	107
6.3	Wiederholbarkeit ( $L_1, L_2$ ) verschiedener Kalibrierungen einer individuellen Antenne (TRM22020.00-GP) über fast zwei Jahre. . . . .	108
6.4	Wiederholbarkeit ( $L_0$ ) verschiedener Kalibrierungen einer individuellen Antenne (TRM22020.00-GP) über fast zwei Jahre und Vergleich derselben Antenne für weiteren Kalibrierungsort ( $L_1, L_2, L_0$ ). . . . .	109
6.5	Wiederholbarkeit der absoluten Feldkalibrierung unterschiedlicher Antennen mit verschiedenen Robotern und an verschiedenen Orten. . . . .	110
6.6	Test zum Nachweis der Unabhängigkeit der PCV aus Absoluter Feldkalibrierung (Versuchsaufbau). . . . .	111
6.7	Ergebnisse des Tests zum Nachweis der Unabhängigkeit der PCV aus Absoluter Feldkalibrierung. . . . .	111
6.8	Differenzen der Kalibrierungen ( $L_1, L_2$ ) einer TRM33429.20+GP mit vier verschiedenen Empfängern. . . . .	112
6.9	Minimale und maximale Abweichungen einzelner PCV-Werte aus Einzelkalibrierungen bezüglich des Gesamtmittels (TRM29659.00). . . . .	113
6.10	Möglichkeiten der PCV-Korrektur im Referenznetz. . . . .	114
6.11	Absolute PCV der AOAD/M_T mit Bezug auf IGS-Niveau. . . . .	116
6.12	Minimale und maximale Abweichungen der PCV-Differenz ( $L_0$ ) zwischen Elevations- und Vollmodell am Beispiel von Antennen mit kleinen azimuthalen Variationen. . . . .	118
6.13	Rein elevationsabhängige Differenzen zwischen IfE und NGS für verschiedene geodätische und Rover-Antennen ( $L_1, L_2$ ). . . . .	121
6.14	Rein elevationsabhängige Differenzen zwischen IfE und NGS für verschiedene geodätische und Rover-Antennen ( $L_0$ ). . . . .	121
6.15	Rein elevationsabhängige Differenzen verschiedener Feldkalibrierungen für eine individuelle geodätische Antenne ( $L_1, L_2$ ). . . . .	122
6.16	Rein elevationsabhängige Differenzen verschiedener Feldkalibrierungen für eine individuelle geodätische Antenne ( $L_0$ ). . . . .	123
6.17	Vergleich azimuthal- und elevationsabhängiger PCV aus zwei verschiedenen Feldkalibrierungen für fünf Antennen ( $L_1, L_2$ ). . . . .	124
6.18	Vergleich azimuthal- und elevationsabhängiger PCV aus zwei verschiedenen Feldkalibrierungen für fünf Antennen ( $L_0$ ). . . . .	124
6.19	Differenz Vollmodell aus zwei Kalibrierungsmethoden. . . . .	125
6.20	Versuchsaufbau zum Nachweis der Auswirkung von Mischungen verschiedener Kalibrierungsmodelle auf Absolut-Niveau. Simulation einer Zero-Baseline. . . . .	126
6.21	Simulierte Zero-Baseline. Einsatz verschiedener PCV aus identischen Kalibrierungsverfahren. . . . .	126

6.22	Simulierte Zero-Baseline. Einsatz verschiedener PCV aus unterschiedlichen Kalibrierungsverfahren. . . . .	127
6.23	Vergleich Absoluter PCV, reines Elevationsmodell, der TRM29659.00 aus Kammer- (Bonn) und Feldmessungen (Hannover). . . . .	128
6.24	Vergleich Absoluter PCV, reines Elevationsmodell, der AOAD/M_T aus Kammer- (NASA GSFC) und Feldmessungen (Hannover). . . . .	129
7.1	Minimale und maximale Abweichungen einzelner PCV-Werte aus Einzelkalibrierungen bezüglich des Gesamtmittels (LEIAT502). . . . .	131
7.2	Phasenzentrumsvariationen der LEIAT502 ( $L_1$ ). . . . .	131
7.3	Phasenzentrumsvariationen der ASH700700.B ( $L_1$ ). . . . .	132
7.4	Phasenzentrumsvariationen der JPSMARANT_GGD ( $L_1$ ). . . . .	132
7.5	Phasenzentrumsvariationen der JPSMARANT_GGD ( $L_0$ ). . . . .	133
7.6	Eckige Form der TRM22020.00-GP. . . . .	133
7.7	Qualitativer Vergleich der Kalibrierungen der TRM22020.00-GP in Normalausrichtung und 45°-Grad verdreht. . . . .	134
7.8	Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00-GP ( $L_1$ ). . . . .	135
7.9	Rein azimutale Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00-GP ( $L_1$ ). . . . .	135
7.10	Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00-GP plus Grundplatte des TCWD-Domes ( $L_1$ ). Zusätzliche Grundplatte unterhalb ARP. . . . .	136
7.11	Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00-GP plus Grundplatte des TCWD-Domes ( $L_1$ ). Der Abstand zwischen Antenne und zusätzlicher Grundplatte wurde vergrößert. . . . .	136
7.12	Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00+GP ( $L_1$ ). Nutzung der Originalgrundplatte. . . . .	137
7.13	Differenz der PCV (JPSLEGANT_SD_E) nach Hochsetzen des Empfangselementes, $L_1$ (links) und $L_2$ (rechts). . . . .	138
7.14	Beispiele für verschiedene Dome-Konstruktionsformen. . . . .	139
7.15	Einfluss einer Domekonstruktion auf die PCV. Differenzen ( $L_1$ , $L_2$ ) mit/ohne Dome für verschiedene Antennen-Dome-Kombinationen. . . . .	140
7.16	Einfluss einer Domekonstruktion auf die PCV. Differenzen ( $L_0$ ) mit/ohne Dome für verschiedene Antennen-Dome-Kombinationen. . . . .	140
7.17	Differenz der Phasenzentrumsvariationen einer TRM29659.00 mit/ohne SCIS-Dome ( $L_0$ ). . . . .	141
7.18	Phasenzentrumsvariationen einer HIPER_GD ( $L_1$ ). . . . .	142
7.19	Phasenzentrumsvariationen einer $L_1$ -NAVSTAR-Antenne. . . . .	143
7.20	Minimale und maximale Abweichungen einzelner PCV-Werte aus Einzelkalibrierungen bezüglich des Typmittels (TRM29659.00). . . . .	144

7.21	Minimale und maximale Abweichungen einzelner PCV-Werte aus Einzelkalibrierungen bezüglich des Typmittels (ASH700700.B). . . . .	144
7.22	Differenz der Phasenzentrumsvariationen einer individuellen TRM29659.00 gegenüber einem Typmittel ( $L_0$ ). . . . .	145
7.23	Differenz der Phasenzentrumsvariationen einer individuellen ASH700228.A gegenüber einem Typmittel ( $L_0$ ). . . . .	146
7.24	Differenz der Phasenzentrumsvariationen einer individuellen LEIAT502 gegenüber einem Typmittel ( $L_0$ ). . . . .	146
8.1	Auswirkung von Antennenfehlern auf die Basislinie am Beispiel der Offsets. . . . .	147
8.2	PCV-Situation bei Nutzung identischer Antennen und kurzer Basis. . . . .	149
8.3	PCV-Situation bei Nutzung unterschiedlicher Antennen und kurzer Basis. . . . .	149
8.4	PCV-Situation bei Nutzung identischer Antennen und langer Basis bzw. gegeneinander verkippte Antennen. . . . .	150
8.5	Gemischtes Netz Messdach. 24h-Auswertung, kurze Basislinien, verschiedene PCV-Modelle. Beispiel für Signal $L_1$ . . . . .	154
8.6	Variationen der Positionsbestimmung (Kurzzeit 0.5h, $L_1$ ). Differenzen zur Soll-Position. . . . .	155
8.7	Unterschiedliche Orientierung einer Antenne. Kinematische Auswertung einer simulierten Zero-Baseline. Differenz in Position zwischen orientierter und nicht orientierter absoluter PCV-Korrektur ( $L_1$ , TRM22020.00-GP). . . . .	157
8.8	Unterschiedliche Orientierung einer Antenne. Kinematische Auswertung einer simulierten Zero-Baseline. Orientierungsangaben und Differenz in Koordinatenkomponenten zwischen orientierter und nicht orientierter absoluter PCV-Korrektur ( $L_1$ ). . . . .	158
8.9	Gemischtes Netz Messdach. 24h-Auswertung, kurze Basislinien, verschiedene PCV-Modelle. Auswirkung Troposphärenmodellierung. Beispiel für Signal $L_0 + \text{trop}$ . . . . .	161
8.10	Auswirkung der Vernachlässigung von PCV-Veränderungen durch den SCIS-Dome auf die Koordinatenlösung am Beispiel verschiedener IGS-Stationen. . . . .	163
8.11	Beispiele TTFA aus Echtzeitsimulation betreffend PCV-Modell. Geodätische Antennen. . . . .	165
8.12	Beispiele TTFA aus Echtzeitsimulation betreffend PCV-Modell. Rover-Antennen. . . . .	166
8.13	Beispielnetz SAPOS <sup>®</sup> Niedersachsen für Echtzeitsimulation betreffend TTFA und PCV-Modell. . . . .	168
8.14	Versuchsaufbau zur Darstellung der Auswirkung absoluter PCV. Simulation einer Zero-Baseline. . . . .	168
8.15	Auswirkung absoluter PCV im globalen Netz (IGS-Stationen). . . . .	169
8.16	Simulation globaler Netzausdehnung durch Antennenkipfung auf Roboter. . . . .	170
8.17	Verschiedene PCV-Modelle und Troposphärenmodellierung. Bernese-Auswertung globales Netz und Schätzung 2h-Troposphärenparameter. . . . .	173





# Tabellenverzeichnis

3.1	Hauptfehlerquellen für die hochpräzise GPS-Positionsbestimmung mit Trägerphasen.	20
4.1	Dämpfung bei unterschiedlicher Polarisierung Sende- und Empfangsantenne. . . .	46
4.2	Minimale erforderliche GPS-Empfangsleistung. . . . .	54
4.3	Abschätzung der Genauigkeit der Positionsbestimmung einer einzelnen Messepoche auf Grund der Genauigkeit der eingeführten PCV-Korrekturen. . . . .	69
5.1	Auswirkung unterschiedlicher Minimumsbedingung auf die Offsetbestimmung. . .	75
5.2	Unterschiedliche Kalibrierungsverfahren und Beispiele für die Offsetbestimmung.	78
5.3	Kalibrierungsergebnisse eines Roboterarmes. . . . .	102
6.1	Vergleich von Kalibrierungen einer TRM22020.00-GP mit unterschiedlichen Empfängertypen. . . . .	112
6.2	Relative und absolute PCV-Korrekturtabelle und Nullantenne. . . . .	115
6.3	Standardabweichungen aus rein elevationsabhängigen Differenzen (bis 10° Elevationsmaske) zwischen IfE und NGS für verschiedene geodätische und Rover-Antennen (Beispiele). . . . .	122
6.4	Standardabweichungen aus Differenzen der Kompletmodelle (bis 10° Elevationsmaske) zwischen verschiedenen Kalibrierungsverfahren und -orten am Beispiel einer geodätischen Antenne. . . . .	125
6.5	Standardabweichungen aus Differenzen zwischen Absolutem Feld- und zwei Kammerverfahren. . . . .	129
7.1	Standardabweichungen aus Differenzen zwischen Individual-PCV und einem Typmittel. . . . .	145
8.1	Gemischtes Netz Messdach. 6 verschiedene Antennentypen. . . . .	153
8.2	Beispiel für Genauigkeit der Höhenkomponente (24h, $L_1$ ) abgeleitet aus Differenzen zur Soll-Position. . . . .	154
8.3	Beispiel für Genauigkeit der Positionsbestimmung (Kurzzeit 0.5h, $L_1$ ) abgeleitet aus Differenzen zur Soll-Position. . . . .	156

8.4	Ergebnisse der kinematischen Positionslösung ( $L_1$ ) einer simulierten Zero-Baseline. Unterschiedliche Antennenmodelle mit/ohne Orientierungsinformation. . . . .	157
8.5	Beispiel für Genauigkeit der Höhenkomponente (24h, $L_0 + \text{trop}$ ) abgeleitet aus Differenzen zur SOLL-Position. . . . .	161
8.6	Beispiel für Genauigkeit der Höhenkomponente (24h, $L_0 + \text{trop}$ ) abgeleitet aus Differenzen zur SOLL-Position. Variation Elevationsmaske. . . . .	162
8.7	IGS-Stationen in Simulation Dome-PCV und Breitenabhängigkeit. . . . .	162
8.8	Beispielnetz SAPOS <sup>®</sup> Niedersachsen. Echtzeitsimulation betreffend TTFA und PCV. . . . .	164
8.9	Beispiele TTFA aus Echtzeitsimulation betreffend PCV-Modell. . . . .	167
8.10	Festlegungen für die Radialkomponente $dz$ der Offsets ( $L_0$ ) der Satellitenphasen-zentren. . . . .	171

# Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft d. Vermessungsverwaltungen d. Länder d. BR Deutschland
ANTEX	Antenna Exchange Format
AR	Axial Ratio
ARP	Antenna Reference Point
A-S	Anti-Spoofing
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen, Berlin
CAS	Controlled Access Service
C/N	Carrier-to-Noise-Ratio
DFNP	Deutscher Funknavigationsplan
DD	Double Difference (Doppelte Differenz)
DoD	Department of Defense, USA
DOP	Dilution of Precision
DORIS	Doppler Orbit Determination and Radiopositioning Intergated by Satellite
DoT	Department of Transportation, USA
DGPS	Differential GPS
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EIRP	Effective Isotropically Radiated Power
ESA	European Space Agency
ETRF/ETRS	European Terrestrial Reference Frame / System
FAA	Federal Aviation Administration, USA
FRNP	Federal Radionavigation Plan
GAN	Global Area Network
GAS	Governmental Access Service
GBAS	Ground-based Augmentation System
GEO	Geostationary Satellite
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GMS	Global Monitoring Stations
GNCC	Global Navigation Control Center
GNSS	Global Navigation Satellite System
G(P)DGPS	Global (Precise) DGPS
GPS	Global Positioning System
HPBW	Half-Power Beamwidth
ICAO	International Civil Aviation Organization
IERS	International Earth Rotation Service
IfE	Institut für Erdmesung, Hannover
IGN	Institute Geographique National, Paris
IGEB	Interagency GPS Executive Board
IGS	International GPS Service
IOC	Initial Operational Capability
ITRF/ITRS	International Terrestrial Reference Frame / System
JPL	Jet Propulsion Laboratory, USA
JPO	Joint Program Office, USA
LAAS	Local Area Augmentation System
LA(P)DGPS	Local Area (Precise) DGPS
LGN	Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, Hannover
LHCP	Left-Handed Circular Polarisation

LNA	Low Noise Amplifier
MCC	Mission Control Center
MEO	Mean Earth Orbiter
MSAS	MTSAT Satellite-based Augmentation System
MTSAT	Multi-functional Transport Satellite
NAVSTAR	NAVigation System for Timing and Ranging
NGS	National Geodetic Survey, USA
NMEA	National Marine Electronics Association
NNSS	Navy Navigation Satellite System
OAS	Open Access Service
OTF	On-The-Fly
PCV	Phase Center Variations (Phasenzentrumsvariationen)
PDGPS	Precise DGPS
PPP	Public Private Partnership
PPS	Precise Positioning Service
PR	Pseudorange
PV	Phase Variations (Phasenvariationen)
PVT	Position, Velocity and Time
PZ90	Parametry Zemli 1990
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RA(P)DGPS	Regional Area (Precise) DGPS
RF	Radio Frequency
RHCP	Right-Handed Circular Polarisation
RIMS	Range and Integrity Monitoring Station
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMS	Regional Monitoring Stations
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real-Time-Kinematic
SA	Selective Availability
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SCC	Satellite Control Center
SCIGN	Southern California Integrated GPS Network
SD	Single Difference (Einfache Differenz)
SIS	Signal-in-Space
SLR	Satellite Laser Ranging
S/N	Signal-to-Noise-Ratio
SPS	Standard Positioning Service
TD	Triple Difference (Dreifache Differenz)
TTA	Time to Alarm
TTFA	Time To Fix Ambiguities
ULS	Uplink Station
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WAD	Wide Area Differential
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS84	World Geodetic System 1984
WRC	World Radio Conference

# Kapitel 1

## Einleitung und Ziele

Das Global Positioning System (GPS) hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten von einem satellitengestützten Navigationssystem zu einem vielfältig genutzten Instrument auch für die hochgenaue Positionsbestimmung weiterentwickelt. Mittlerweile wird GPS ebenso standardmäßig in geodätischen und geodynamischen Anwendungen in Genauigkeitsbereichen von Zentimetern bis hinunter zu Millimetern eingesetzt. Die bisherigen und aktuellen Entwicklungen beschäftigen sich dabei vor allem mit dem Ziel, dieses Genauigkeitsniveau zuverlässig auch regional und global und zudem mit immer kürzeren Messzeiten bis hin zu Echtzeitanwendungen zu erreichen. Dieses ist bereits für viele Einsatzgebiete realisiert.

Voraussetzung zur Ausschöpfung weiterer Verbesserungspotentiale und speziell für das Erreichen von noch zuverlässigeren Ergebnissen ist die eingehende Auseinandersetzung mit dem Fehlerhaushalt von GPS. Die letzten Jahre haben insbesondere im Bereich der entfernungsabhängigen Fehler entscheidende Entwicklungen im Vermessungswesen wie beispielsweise innerhalb eines vernetzten Echtzeitbetriebs von Referenzstationen gebracht. Dabei wurde allerdings auch schnell klar, dass für weitere Genauigkeitssteigerungen speziell die systematischen Einflüsse der stationsabhängigen Fehlerkomponenten erfasst werden müssen. Neben der separaten Betrachtungsweise dieser Fehler ist zudem deren Verbindung zu den anderen von Bedeutung, da erst das Verständnis für das Zusammenspiel aller systematisch wirkenden Einflüsse das Erreichen eines neuen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsniveaus ermöglicht.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Unsicherheiten des Empfangsverhaltens der GPS-Antennen genau untersucht. Phasenzentrumsvariationen (PCV) der Empfangsantennen können eine Größenordnung von Millimetern bis Zentimetern und entsprechende bzw. teilweise sogar verstärkte Auswirkungen auf die hochpräzise Positionsbestimmung haben. Ziel ist es hier, die theoretischen Grundlagen aus der Elektrotechnik und für die Fehlerbeschreibung zu erarbeiten, Kalibrierungsmethoden darzustellen, Ergebnisse für verschiedene Antennen(typen) herauszuarbeiten und die Einflüsse innerhalb verschiedener Anwendungen der Positionsbestimmung zu erläutern. Grundlage für den größten Teil aller Untersuchungen bildet dabei das Absolute Feldkalibrierungsverfahren. Die Entwicklungen für diese Kalibrierungsmethode und die resultierenden Ergebnisse sind ein entscheidender Schritt für Verbesserungen im GPS-Fehlerhaushalt.

Entsprechend den genannten Zielen gliedert sich die Arbeit in neun Kapitel. Hintergründe, Entwicklungen und notwendige Literaturhinweise die jeweilige Thematik betreffend werden bereits zu Beginn und im weiteren Verlauf jedes Kapitels zusammengefasst. Nach dieser Einleitung folgt in Kapitel 2 eine Übersicht über die Entwicklung der satellitengestützten Positionsbestimmung mit

Fokus auf das GPS. Daneben werden aktuelle Entwicklungen anderer globaler Satellitenpositionierungssysteme aufgezeigt. Die Gesamtschau dieser Systeme und ihrer technischen Verbesserungen, der verschiedenen Arten von Anwendungen und Auswertungen ermöglicht die Beurteilung des Potentials für die hochpräzise Positionsbestimmung.

Kapitel 3 bildet eine stark zusammenfassende Darstellung der GPS-Theorie speziell für die Nutzung der Phasenbeobachtungen. Neben grundlegenden Aspekten wie den Einzelheiten der Beobachtungsgleichung werden Teilaspekte der Komponenten des GPS-Fehlerhaushalts näher beschrieben. Die im Zusammenhang mit den Phasenzentrumsvariationen auftretenden Korrelationen zu anderen Parametern werden näher beschrieben. Dieser Überblick erlaubt die Einordnung des Problems der Phasenzentrumsvariationen in Theorie und Fehlerbudget des GPS und zeigt den Stand einiger Entwicklungen zur Korrektur verschiedener Fehlereinflüsse in hochgenauen Anwendungen.

Die elektrotechnischen Grundlagen von Antennen im Allgemeinen und von GPS-Antennen im Besonderen sind im reinen Anwendungsbereich des Vermessungswesens eher wenig bekannt. Gerade hier ist allerdings Hintergrundwissen erforderlich, wenn beispielsweise Auswirkungen bestimmter Konstruktionsmerkmale in Kalibrierungsergebnissen und Anwendungen beurteilt werden müssen. Kapitel 4 gibt - mit der Zielrichtung GPS-Nutzung - eine ausführliche Beschreibung elektromagnetischer Wellen, der Aufgaben und Eigenschaften von bestimmten Antennenkonstruktionen und der dabei auch für den Anwender und Käufer wichtigen die Antenne charakterisierenden Größen. Weiterhin wird die Beschreibung der Phasenzentrumsvariationen formell aufbereitet und die Anforderungen an Antennen in der hochgenauen Vermessung formuliert und theoretisch beleuchtet.

Bereits in den achtziger Jahren wurde auf Grund von Erkenntnissen aus elektrotechnischen Untersuchungen in Messkammern die Gesamtproblematik des Antennenempfangsverhaltens erkannt. Die Entwicklungen von operationellen und genauen Feldkalibrierungsverfahren haben aber erst Anfang/Mitte der neunziger Jahre begonnen, da die Anforderungen durch wesentliche Verbesserungen der Geräte und der Mess- und Auswerteverfahren stark gestiegen waren. Kapitel 5 stellt Entwicklungen und Einzelheiten der verschiedenen Prüf- bzw. Kalibrierungsverfahren vor. Dazu gehören Verfahren zur reinen Offset-Bestimmung, die relative Feldkalibrierung und die absolute Kalibrierung in Messkammern. Die Absolute Feldkalibrierung als Hauptbeitrag in dieser Arbeit wird detailliert in sämtlichen Entwicklungsstufen vom Post-Processing hin zum automatisierten Echtzeitverfahren dargestellt. Dazu gehört auch die Nutzung eines Roboterarms.

Im anschließenden Kapitel 6 werden vorab umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich der Genauigkeit des absoluten Feldverfahrens durchgeführt, da die hochgenauen Ergebnisse auch als Referenz für später geführte quantitative Vergleiche mit den anderen Verfahren genutzt werden. Vor der Betrachtung dieser Verfahrensvergleiche wird die Umrechnung der Ergebnisse unterschiedlicher Kalibrierungsmethoden mit jeweils anderem Bezugsniveau aufbereitet. Diese Überführung ist Voraussetzung für Vergleiche und speziell auch für die Nutzung konsistenter Korrekturwerte aus verschiedenen Verfahren. Als eine Möglichkeit hierfür wird an dieser Stelle die sog. Nullantenne vorgestellt.

Durch das hochauflösende absolute Feldverfahren steht erstmals eine Methode zur Verfügung, die eine genaue, quasi umgebungsunabhängige Beschreibung der Auswirkungen und Einflüsse verschiedenster Antennenkonstruktionen erlaubt. In Kapitel 7 werden anhand von Beispielanntenen diese Effekte aufgezeigt, u.a. mit Details zu azimutalen PCV, zu Rover-Antennen, zum Einfluss von Grundplatten und zu Dome-Konstruktionen. Weiterhin werden Untersuchungen zur Individual- und Typkalibrierung vorgestellt.

Neben den Kalibrierungsverfahren selbst und deren Ergebnissen ist besonders die Auswirkung der PCV und deren (Nicht-)Berücksichtigung in verschiedenen GPS-Anwendungen von hohem Interesse. Kapitel 8 fokussiert dafür speziell auf hochpräzise Anwendungen verschiedener Entfernungsbereiche. Dabei werden durch ausgewählte Beobachtungskonfigurationen und teilweise durch Simulationsmessungen die grundlegenden Auswirkungen der Phasenzentrumsvariationen herausgearbeitet, die zusammen mit den theoretischen und praktischen Ergebnissen aus den Vorkapiteln eine Beurteilung der Vielzahl unterschiedlicher Beobachtungsszenarien ermöglicht. Dazu gehören lokale statische und kinematische Anwendungen mit verkippten Antennen, sowie verschiedene Netz- und Auswertekonfigurationen regionaler bzw. globaler Netze. Hierbei werden u.a. noch speziell die Korrelation der PCV mit der Troposphärenmodellierung, die Initialisierungszeiten der Mehrdeutigkeitsbestimmung in Abhängigkeit des PCV-Modells, die breitenabhängige Auswirkung der PCV-Korrektur und die grundsätzliche Notwendigkeit für die Nutzung absoluter PCV in bestimmten Anwendungen behandelt.

Vor dem abschließenden Literaturverzeichnis bildet Kapitel 9 den Schluss dieser Arbeit mit der Zusammenfassung der Ergebnisse. Zudem wird ein Ausblick über mögliche und notwendige Entwicklungen gegeben, die thematisch direkt im Zusammenhang mit dem Empfangsverhalten der GPS-Antenne stehen bzw. die sich durch die Verzahnung mit diesem Teil des Fehlerhaushaltes ergeben.

## Kapitel 2

# Entwicklungen und Anwendungen des Global Positioning System GPS

Die Entwicklung der satellitengestützten Positionierung hat in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten einen rasanten Verlauf genommen. Das Radionavigationssystem NAVSTAR GPS (*NAVigation System with Time And Ranging, Global Positioning System*) des amerikanischen Verteidigungsministeriums (*United States Department of Defense, U.S. DoD*) spielt dabei die zentrale Rolle. Die Kernpunkte der Entwicklung des Systems waren vor allem auf die präzise Navigation für den militärischen Bereich ausgerichtet, wobei aber auch eine in der Genauigkeit eingeschränkte zivile Nutzung möglich sein sollte. Die Möglichkeit der präzisen geodätischen Positionsbestimmung mit Hilfe der hochauflösenden Phaseninformation war zu Beginn der Entwicklung von GPS noch gar nicht derartig geplant, wie sie aktuell angewendet wird (*Parkinson 1996*). Das Potential für entsprechende Anwendungen wurde aber schnell erkannt. Heute ist GPS aus dem Vermessungswesen nicht mehr wegzudenken und wird neben anderen Raumverfahren wie VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*) und DORIS (*Doppler Orbit Determination and Radiopositioning Integrated by Satellite*) standardmäßig für die Realisierung von Bezugssystemen eingesetzt (*Sillard u.a. 1998*). Für die hochgenaue Vermessung ist „der Zentimeter“ längst nicht mehr nur Ziel, sondern in vielen Bereichen bereits alltäglich. Dies zeigt sich in der nachträglichen Auswertung (*Post-Processing*) von Daten global verteilter Stationen wie auch in Echtzeit-Anwendungen im lokalen und regionalen Bereich. Eine Genauigkeit in der Größenordnung von Millimetern ist in einigen Bereichen wie Geodynamik und Deformationsanalyse mit Hilfe der Langzeitbeobachtungen von Permanentstationen keine Utopie mehr. Das Erreichen dieser Genauigkeitsstufe auch für kürzere Messzeiten und sogar für Echtzeitanwendungen ist Gegenstand aktueller Forschung.

Der angesprochene Genauigkeitsbereich von einem Zentimeter und besser für die hochpräzise Positionsbestimmung, zum Beispiel in der Geodäsie, betrifft nur einen kleinen Bereich der möglichen Anwendungen eines Systems zur Bestimmung von Position, Geschwindigkeit und Zeit PVT (*Position, Velocity, and Time*). Die Bandbreite der Nutzungen des GPS, eines globalen Navigationssystems GNSS (*Global Navigation Satellite System*) oder der Kombination verschiedener Systeme im militärischen aber vor allem auch zivilen Sektor ist geradezu unendlich groß. Einen Überblick hierzu gibt zum Beispiel der Deutsche Funknavigationsplan (*BMVBW 1999*) oder der amerikanische Federal Radionavigation Plan (*DoD und DoT 1997*). Die sich daraus ergebenden Anforderungen für den Ausbau eines solchen Systems und die Entwicklungen der Systemcharakteristika haben Auswirkungen auf die Entwicklungen im schmaleren Segment der präzisen Positionsbestimmung (vgl. Abschnitt 2.2). Zu den Systemcharakteristika gehören PVT-Genauigkeit,



Integrität, Verfügbarkeit, Sicherheit, Kontinuität, Kostenrahmen, Über- bzw. Abdeckung, Möglichkeiten der Kontrolle und Unterstützung, Überlebensfähigkeit und Interoperabilität von Systemen und Anwendungen (AFSC 1997). Das für die hochpräzise Vermessung nicht allein die Genauigkeit entscheidend ist, zeigen u.a. Referenzstationsnetze wie der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS<sup>®</sup> (Hankemeier 2000). Dabei wird ersichtlich, dass neben der Verbesserung von Auswertelgorithmen und Messmethoden zur Steigerung der Genauigkeit auch Eigenschaften wie Verfügbarkeit und Kontinuität von höchster Priorität sind, da sich in absehbarer Zeit in den Grundlagennetzen ein Wandel vom dichten Festpunktfeld hin zum aktiven dreidimensionalen Bezugssystem ergeben wird (Jahn 2001).

## 2.1 Funktion, Aufbau und Entwicklungen des GPS und zukünftigen GNSS

Die Entwicklung und Koordinierung zum Aufbau von GPS begann 1973 mit der Gründung des JPO (*Joint Program Office*) im amerikanischen Verteidigungsministerium. Das Vorgängersystem NNSS (*Navy Navigation Satellite System*) oder TRANSIT zeigte die guten und vielfältigen Möglichkeiten eines globalen satellitengestützten Navigationssystems auf. Dabei wurden - im Gegensatz zu den Streckenmessungen beim GPS - Dopplerbeobachtungen zur Positionsbestimmung genutzt. Auf Grund der guten Ergebnisse wurde es ungefähr ab 1970 auch im geodätischen Bereich eingesetzt (Seeber 1993). Wesentliche Verbesserungen hin zu einer präzisen, kontinuierlichen und globalen Echtzeitpositionierung waren die Ziele für den Aufbau des GPS. Es wurden verschiedene Forderungen gestellt (Spilker und Parkinson 1996), die sich seither in allen Entwicklungsphasen des Weltraum-, Kontroll- und Nutzersegments vom GPS widerspiegeln. Zusammengefasst gehört die Forderung nach hochgenauer Echtzeitinformation über Position, Geschwindigkeit und Zeit für den militärischen Nutzer und einer herabgesetzten Genauigkeit für zivile Nutzungen dazu. Weiterhin soll das System 24 Stunden am Tag weltweit und wetterunabhängig nutzbar sein und Sicherheit gegen Störungen (*Jamming, Interference*) gewährleisten. Zudem soll über den Zugang zur Phaseninformation auch die präzise geodätische Nutzung sichergestellt werden. Die notwendigen Geräte für den Nutzer müssen günstig und zuverlässig sein. Und letztlich muss der Betrieb des Weltraum- und Kontrollsegments selbst speziellen Anforderungen wie u.a. Beschränkungen der Bandbreite und Frequenzzuordnung, Möglichkeiten zur Berechnung von Satellitenbahnen und Satellitenuhren, Gewährleistung der Datenströme zum und vom Satelliten genügen.

1978 erfolgte der erste Start eines GPS-Satelliten. Die ursprüngliche Planung des ausgebauten Systems beinhaltete 24 Satelliten in drei Bahnebenen (Bahnhöhe 20200 km) mit einer Inklination von  $63^\circ$ . Mit der zweiten Satellitengeneration Block II wurde die Bahnneigung auf  $55^\circ$  und die Anzahl der Bahnebenen auf sechs geändert. Es finden zwei Satellitenumläufe pro siderischem Tag statt. Eine vorläufige Endausbaustufe IOC (*Initial Operational Capability*) mit 24 Satelliten für den zivilen Betrieb wurde am 08. Dezember 1993 erreicht. Die volle Operationalität FOC (*Full Operational Capability*) für den militärischen Bereich wurde am 17. Juli 1995 erklärt. Bereits seit 1980 wurde die Planung des Systems gemeinschaftlich vom DoD für den militärischen und dem DoT (*Department of Transportation*) für den zivilen Sektor durchgeführt. Im Jahr 1996 wurde das IGEB (*Interagency GPS Executive Board*) ins Leben gerufen, um den weiteren Ausbau und die Modernisierung des Systems zu planen.

Das Prinzip der Positionsbestimmung beruht auf Einweg-Entfernungsmessungen zwischen Satellit und Empfänger. Das Signalspektrum des Systems liegt im L-Band (1 - 2 GHz). Die Satelliten der aktuellen Konstellation, bestehend aus Block II, Block IIA (*Advanced*) und bereits einigen

Block IIR (*Replenishment*), senden Signale auf zwei Trägerwellen  $L_1$  und  $L_2$  mit den Frequenzen  $f_1 = 1575.42$  MHz und  $f_2 = 1227.60$  MHz aus. Diesen sind Navigationssignale (Codes) und Navigationsnachrichten aufmoduliert. Auf das  $L_1$ -Signal sind der genauere P-Code (*Precise Code*) und der C/A-Code (*Course/Aquisition-Code*) aufmoduliert. Die zweite Frequenz enthält nur den P-Code. Alle Signale werden aus der Grundfrequenz 10.23 MHz abgeleitet. Zur Unterscheidung der Satelliten ist jedem ein bestimmter Code zugeordnet (*Code Division Multiple Access CDMA*). Durch die Code-Modulation des hochfrequenten Trägersignals wird die Bandbreite des Signals erhöht. Diese sog. spektrale Spreizung (*Spread Spectrum*) hat u.a. eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Störsignalen zur Folge. Die Rückgewinnung des ursprünglichen Signals und somit letztlich auch der Zugang zur hochgenauen Phaseninformation geschieht über die Korrelation mit einem im Empfänger erzeugten und dem des Satelliten identischen Codes. Aus der maximalen Korrelation ergibt sich gleichzeitig die Signallaufzeit. Sehr detaillierte und in ihrem Umfang für diese Arbeit nicht notwendige Beschreibungen der GPS-Signalstruktur und -verarbeitung finden sich u.a. in *Spilker (1996a,b)*.

Durch die Systemsicherungsmaßnahme A-S (*Anti-Spoofing*) wird der P-Code in den für zivile Nutzer nicht zugänglichen Y-Code umgewandelt, sodass im sog. SPS (*Standard Positioning Service*) prinzipiell nur noch das  $L_1$ -Signal mit dem ungenaueren C/A-Code zur Verfügung steht. Geodätische Empfänger können aber mit verschiedenen Verfahren (*Breuer u.a. 1993*) auch ohne direkte Code-Kennntnis  $L_2$ -Messgrößen mit erhöhtem Rauschniveau erzeugen. Eine weitere künstliche Signalverschlechterung ist SA (*Selective Availability*). Dabei können grundsätzlich über das *Dithering* ( $\delta$ -Prozess) die Satellitenuhr beeinflusst und über den  $\epsilon$ -Prozess die Bahnen verfälscht werden. SA wurde offiziell am 01. Mai 2000 abgestellt, nachdem es erstmalig 1990 aktiviert wurde. Militärische Nutzer im PPS (*Precise Positioning Service*) sind von diesen Maßnahmen nicht betroffen, da die Effekte mit Kenntniss der Verschlüsselung rückgängig gemacht werden können.

Bei der einfachen absoluten Positionierung mit Codes wird die Streckenmessung aus der Signallaufzeit abgeleitet. Dabei ergibt sich die sog. *Pseudorange*-Messung  $PR$  (metrisch) zwischen dem Empfänger  $i$  und dem Satelliten  $k$  aus der mit der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  multiplizierten Differenz zwischen Signalempfang  $T_i$  im Empfängerzeitrahmen und Signalausendung  $t_k$  im Satellitenzeitrahmen:

$$PR_{i^k} = c_0 \cdot (T_i - t^k) + \varepsilon_{i^k}. \quad (2.1)$$

In diesem sehr vereinfachten Modell sind sämtliche weitere Fehler wie zum Beispiel atmosphärische und stationsabhängige Einflussparameter im Term  $\varepsilon_{i^k}$  zusammengefasst. Auf Grund der fehlenden Synchronisation zwischen Empfänger- und Satellitenzeit ergibt sich eine fehlerhafte Laufzeitmessung (Pseudostrecke). Die Umformung in den GPS-Zeitrahmen  $\tau$  durch die Berücksichtigung eines Empfängeruhrfehlers  $dT$  und eines Satellitenuhrfehlers  $dt$  ergibt

$$\begin{aligned} PR_{i^k} &= c_0 \cdot \left( (\tau_i - dT_i) - (\tau^k - dt^k) \right) + \varepsilon_{i^k} \\ &= c_0 \cdot (\tau_i - \tau^k) + c_0 \cdot (dt^k - dT_i) + \varepsilon_{i^k} \\ &= \rho_{i^k} + c_0 \cdot (dt^k - dT_i) + \varepsilon_{i^k} \\ &= |\mathbf{X}^k - \mathbf{X}_i| + c_0 \cdot (dt^k - dT_i) + \varepsilon_{i^k}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Werden nun die Satellitenposition  $\mathbf{X}^k$  und der Satellitenuhrfehler  $dt$  als bekannt angenommen und atmosphärische Fehler mit einfachen Modellen korrigiert, so verbleiben als Unbekannte die in der geometrischen Distanz  $\rho_i^k$  enthaltenen drei Komponenten der Empfängerposition  $\mathbf{X}_i$  und der Empfängeruhrfehler  $dT$ . Damit ist eine einfache Positionsbestimmung mit Einfrequenzbeobachtungen zu vier Satelliten möglich. Laut den Genauigkeitsspezifikationen für zivile Nutzer des GPS (*DoD 1995*) wird dabei unter SA beispielsweise ein horizontaler Punktfehler (95 %) 100 m nicht übersteigen. Eine Überarbeitung der Spezifikationen (*DoD 2001*) im Hinblick auf die Modernisierung des Systems zeigt Verbesserungen dieser Genauigkeiten. Ohne SA soll der horizontale Punktfehler (95 %) global kleiner als 13.0 m sein (*Signal-in-Space SIS*). Konservative Schätzungen für einen Einfrequenzempfänger und unter Einbeziehung der Fehler des Ionosphärenmodells, des Troposphärenmodells und des Empfängerrauschens ergeben einen Wert von 33.0 m. Nach Abschaltung von SA ist die ionosphärische Laufzeitverzögerung wieder die Hauptfehlerquelle der absoluten Positionsbestimmung. Diese ist zukünftig auch für den nichtmilitärischen Nutzer durch die Nutzung von zwei zivilen Frequenzen korrigierbar. Zwei Untersuchungen in *DoD (2001)* zeigen maximale horizontale Fehler (95 %) von 2.6 und 3.1 m. In einer Abschätzung in *Shaw u. a. (2000)* wird ein maximaler horizontaler Fehler (95 %) von 8.5 m angegeben.

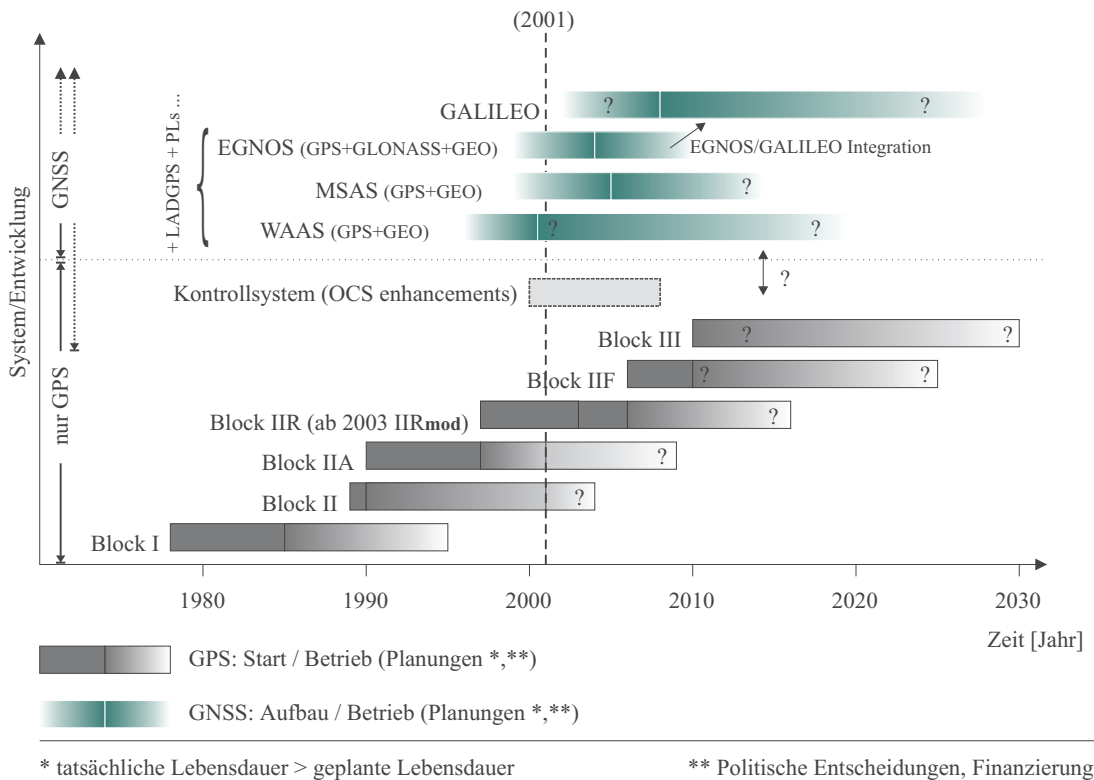


Abbildung 2.1: Entwicklungen von GPS/GNSS - Start, Aufbau, Ausbau und Betrieb.

Sowohl die angesprochenen Sicherungsmaßnahmen als auch die geplante Modernisierung des Systems sind - neben etlichen Veränderungen im Kontrollsegment - eng mit dem Ausbau des Weltraumsegmentes verknüpft (*Shaw u. a. 2000*). Dies betrifft vor allem die Entwicklung neuer GPS-Satellitengenerationen. So erlaubt der neue Satellitentyp Block IIR eine autonome Navigation (*Autonomous Navigation AUTONAV*), wodurch das Datenalter der Broadcast-Bahnen deutlich verringert werden kann. Nach einer Modifizierung der noch nicht gestarteten Satelliten vom Typ Block IIR wird neben einer erhöhten Signalstärke und neuen militärischen Codes auf beiden

Frequenzen (*M-Codes*) dem zivilen Nutzer auch auf  $L_2$  ein ziviler Code zur Verfügung gestellt. Die ursprüngliche Planung einer einfachen Übertragung des C/A-Codes auf  $L_2$  wurde durch eine modernere Entwicklung des sog. L2C-Signals ersetzt (*Fontana u.a. 2001*). Das L2C-Signal ähnelt dem zukünftigen dritten zivilen Signal  $L_5$ , wird aber bereits auf den Block IIR-M Satelliten mit den ab 2003 geplanten Starts verfügbar sein. L2C besteht aus den zwei Code-Komponenten CM (*moderate length code*) und CL (*long code*), ohne Datensignal auf CL. Die nachfolgende Satellitengeneration Block IIF (*Follow-On*) wird zusätzlich - neben einer wiederum deutlich erhöhten Lebensdauer, Signalstärke und eines sog. *Crosslink Navigation Update Mode* zur sehr schnellen Aufdatierung der Broadcast-Information (*Ghassemi und Fisher 1997*) - ein drittes ziviles Signal  $L_5$  auf der Frequenz  $f_5 = 1176.45$  MHz ausstrahlen. Das Signal besteht aus zwei Komponenten I (*In-Phase Component*) und Q (*Quadratur Component*) mit jeweils unterschiedlichen Codes I5 und Q5 und einem Datensignal nur auf der ersten Komponente (*Van Dierendonck und Hegarty 2000*). Auf  $L_5$  werden neben dem zivilen keine militärischen Codes mehr liegen. Erhebliche Verbesserungen ergeben sich mit diesen Entwicklungen der zivilen Signale auf  $L_2$  und  $L_5$  u.a. auch - neben den Zweifrequenz-Möglichkeiten in sicherheitsrelevanten Navigationsanwendungen wie zum Beispiel in der Luftfahrt - für die Phasenmessung hinsichtlich der Auswirkungen von Störsignalen, Interferenzen und Mehrwegeeffekten (*Multipath MP*). Die angesprochenen Modernisierungen des Systems reichen bis ins Jahr 2010 (Abbildung 2.1). Um zukünftigen militärischen und zivilen Anforderungen bis ungefähr 2030 zu genügen, wird aktuell die Satellitengeneration Block III geplant.

Neben GPS gibt es als zweites unabhängiges und auch militärisches Satellitennavigationssystem das russische GLONASS (*GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM*). Seit 1982 wurden insgesamt mehr als 80 Satelliten gestartet. Die GLONASS-Konstellation besteht wie GPS aus 24 Satelliten. Tatsächlich stehen vor allem aufgrund der kurzen Lebensdauer und finanzieller Aspekte aktuell weit weniger Satelliten zur Verfügung, zwischen 2001 und Anfang 2002 meist weniger als 10. In neueren Planungen wird beabsichtigt, ab 2001 eine reduzierte Konstellation von 12 operationellen Satelliten auf Dauer vorzuhalten (*Müller 2001*). Ziel ist ab 2004 der Einsatz von GLONASS-M-Satelliten mit einer von drei auf acht Jahre erhöhten Lebensdauer und später GLONASS-K-Satelliten mit einer Lebensdauer von 10 Jahren. Die GLONASS-Konstellation ist grundsätzlich in drei Bahnebenen mit einer Bahnhöhe von 19100 km und jeweiliger Bahnneigung von  $64.8^\circ$  aufgeteilt. Aufgrund der Umlaufzeit von weniger als zwölf Stunden ergibt sich eine Wiederholung der Konstellation nach acht Sterntagen. Unterschiede zu GPS ergeben sich weiterhin durch die Systemzeit mit Bezug auf  $UTC_{SU}$  und das Referenzsystem der Ephemeriden. Dies war bis 1993 das SGS85 (*Soviet Geodetic System 1985*), danach folgte PZ90 (*Parametry Zemli 1990*). Es werden zwei Trägerwellen im L-Band ausgesendet. Im Gegensatz zum CDMA bei GPS wird das sog. FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) eingesetzt. Die einzelnen Satelliten werden durch jeweils andere Frequenzen unterschieden. Für  $L_1$  beträgt die Frequenz  $f_1 = 1602 + k \cdot 0.5625$  MHz, für  $L_2$  ist  $f_2 = 1246 + k \cdot 0.4375$  MHz. Dabei ist  $k$  die sog. *Frequency Channel Number*. Die Modulation mit C/A-Code auf  $L_1$  und mit P-Code auf beiden Frequenzen ist für alle Satelliten gleich. Weitere Details zu GLONASS und Vergleiche mit GPS finden sich zum Beispiel in *Langley (1997b)* sowie *Daly und Misra (1996)*.

Neben den Entwicklungen der GNSS GPS und GLONASS finden weltweit Initiativen zur Etablierung weiterer Ausbaustufen eines GNSS statt. Zur ersten Stufe GNSS-1 gehören die sog. weltraumgestützten Erweiterungen SBAS (*Satellite-based Augmentation Systems*), auch in Verbindung mit bodengestützten Systemen GBAS (*Ground-based Augmentation Systems*). Dies sind das europäische EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), das amerikanische WAAS (*Wide Area Augmentation System*) und das eng an WAAS angelehnte japanische MSAS (*MTSAT (Multi-functional Transport Satellite) Satellite-based Augmentation System*).

Diese regionalen Ausbaustufen sind vor allem als Weiterentwicklungen für zivile Navigationsanwendungen zu sehen. Ursprünglich wurde der Begriff GNSS von der ICAO (*International Civil Aviation Organization*) geprägt. Im Rahmen einer gesteigerten Flugdichte wurde und wird die Satellitennavigation als wichtiges Instrument angesehen. Allerdings werden in Sicherheitsvorschriften solche Navigationssysteme ausgeschlossen, die nicht öffentlich und nicht zivil kontrolliert werden können (*Müller 2001*). Bei diesen Systemen können somit keine Garantien zum Beispiel hinsichtlich Betrieb und Verfügbarkeit gegeben werden. Deshalb wurden zwei Ausbaustufen geplant. In der ersten Stufe GNSS-1 verbleiben GPS und GLONASS als Basissysteme. Hinzu kommen die regionalen und zueinander kompatiblen Ausbaustufen für erhöhte Genauigkeit, Integrität, Verfügbarkeit und Kontinuität (*Accuracy, Integrity, Availability and Continuity of Service*). Zudem müssen Grenzwerte für die Übermittlung von Fehlfunktionen innerhalb eines bestimmten Zeitraumes, die sog. Warnungsdauer TTA (*Time to Alarm*), eingehalten werden.

Zur Einhaltung spezieller sicherheitsrelevanter Kriterien - zum Beispiel der zivilen Luftfahrt für verschiedene Flugphasen wie En-route, Terminal, nicht-präzise und präzise Landeanflüge der Kategorie I (CAT I) - wird bei EGNOS zusätzlich zu GPS und GLONASS eine umfangreiche eigene Systemarchitektur aufgebaut (*Loddo u.a. 1996*). Dazu gehören das Weltraumsegment mit sog. GEOs (geostationäre Satelliten, z.Zt. zwei Inmarsat), die ein zusätzliches GPS-kompatibles  $L_1$ -Signal, Integritätssignale und WAD-Korrekturen (*Wide Area Differential*) von GPS und GLONASS ausstrahlen. Im Bodensegment werden in einem Netzwerk verschiedener Gruppen von Stationen der Datenempfang durch die sog. RIMS (*Range and Integrity Monitoring Stations*), die Datenverarbeitung und -auswertung durch die sog. MCC (*Mission Control Centers*) und die Datenaussendung zu den GEOs durch die sog. NLES (*Navigation Land Earth Stations*) sichergestellt. Die Koordination aller Entwicklungen läuft über die Europäische Kommission, über die ESA (*European Space Agency*) und über EUROCONTROL. Auch beim WAAS (*Loh 1995*) der amerikanischen FAA (*Federal Aviation Administration*) wird auf GEO-Satelliten und auf ein eigenes Bodensegment zurückgegriffen. Die Referenzstationen sind über ganz Amerika verteilt. Als Basissystem wird nur GPS genutzt. Die WAAS-Spezifikationen (*Pinker u.a. 2000*) geben bestimmte Primärfunktionen an. Dazu gehören die Bestimmung von Satellitenintegrität, von Korrekturdaten, die Berechnung ionosphärischer Korrekturen, die Erzeugung von Datensignalen für GEO-Satelliten, die unabhängige Kontrolle all dieser Daten, die Erzeugung der WAAS-Daten- und Ranging-Signale und der Betrieb und die Kontrolle des gesamten Systems. Als eine Ausbaustufe bei WAAS ist als weiteres bodengestütztes System LAAS (*Local Area Augmentation System*) geplant, um u.a. präzise Landeanflüge der Kategorien II und III (CAT II, III) durchführen zu können. LAAS besteht aus lokalen Referenzstationen im Landebereich, die einerseits als Pseudolites mit einem weiteren GPS-ähnlichen Signal zur Verbesserung der Geometrie beitragen. Andererseits können Korrekturdaten auf Basis kurzer Stationsentfernungen eines LADGPS (*Local Area Differential GPS*) zur Verfügung gestellt werden. Pseudolite-Systeme können auf Code-, sowie auch auf Basis von Phasenbeobachtungen betrieben werden (*Elrod und Dierendonck 1996*). Hier liegt eine Verbindung zu hochpräzisen Anwendungen, da die Entwicklungen von GNSS vor allem auf Navigationsanwendungen basierend auf Code-Beobachtungen ausgerichtet sind.

GNSS-2 beinhaltet den kompletten Neuaufbau eines eigenständigen, unter zivilen Aspekten konzipierten globalen GNSS, welches interoperabel mit bestehenden Systemen ist. Für bestimmte Dienste sollen dabei rechtliche Garantien für Funktion und Kontinuität gegeben werden. In einer Entschließung des Rates der Europäischen Gemeinschaft im Juni 1999 wurde der Aufbau eines europäischen Navigationssystems GALILEO empfohlen. In einer Definitionsphase bis Ende 2000 hat die Europäische Kommission und die ESA mehrere Studien bezüglich GALILEO durchführen lassen. Dazu gehörten u.a. Untersuchungen zur Erarbeitung der gesamten Systemarchitektur (GALA), des Weltraumsegments (GalileoSat), zur Definition verschiedener Dienste (GEMINUS)

usw. (Augath 2001). Eine Entwicklungs- und Validierungsphase ist zwischen 2001 und 2005, die Errichtungsphase bis 2007 und die kommerzielle Betriebsphase ab 2008 geplant. Für GALILEO sind vier verschiedene Serviceebenen bzw. Dienste für unterschiedliche Nutzergruppen vorgesehen, die sich hinsichtlich der Anforderungen an Genauigkeit, Integrität, Kontinuität und Verfügbarkeit unterscheiden (Weber und Schäfer 2001)

Um den Anforderungen des Massenmarkts zu genügen, wird ein gebührenfreier Grunddienst OAS (*Open Access Service*) eingeführt. Dieser Dienst ist letztlich in Konkurrenz zu GPS Block IIF und Block III zu sehen. Die nächste Serviceebene ist der gebührenpflichtige Dienst CAS1 (*Controlled Access Service 1*), der für kommerzielle und professionelle Anwendungen gedacht ist. Er entspricht im Wesentlichen den Leistungen des OAS, beinhaltet aber zusätzlich verschlüsselte globale Integritätsinformationen. Hinsichtlich Genauigkeit, Robustheit und Integrität müssen hier im Vergleich zu OAS, aber auch zu GPS Block IIF inklusive WAAS/EGNOS-Ausbaustufe höhere Anforderungen gestellt werden. Für bestimmte autorisierte Nutzer sind bei CAS1 zudem LADGPS-Korrekturen geplant. Zudem sollen mindestens drei Frequenzen für eine verbesserte Mehrdeutigkeitslösung bei Phasenbeobachtungen verfügbar sein. Die dritte auch gebührenpflichtige Service-Ebene CAS2-SAS (*Controlled Access Service 2 - Safety of Life Access Service*) zielt auf sicherheitskritische Anwendungen wie zum Beispiel Anforderungen an Navigation in der zivilen Luftfahrt ab. Eine bessere Positionierungsgenauigkeit bei gleichzeitig erhöhter Verfügbarkeit und zusätzlicher regionaler Integritätsinformation wird angestrebt. Der vierte, ebenfalls gebührenpflichtige, Dienst CAS2-GAS (*Controlled Access Service 2 - Governmental Access Service*) soll sich von SAS in der Art der Verschlüsselung und der Wahl der Trägerfrequenzen unterscheiden, um eine höhere Übertragungssicherheit zu erreichen. Zusätzlich soll bei CAS1 und CAS2 ein 2-Weg-Kommunikationsservice SAR (*Search and Rescue*) für Notsituationen als entscheidende Weiterentwicklung des bestehenden Systems COSPAS-SARSAT eingerichtet werden.

Die globale Komponente von GALILEO soll aus mehreren Segmenten bestehen. Das Raumsegment umfasst die Satelliten und die zugehörigen Elemente SCC (*Satellite Control Center*) und ULS (*Uplink Stations*). Das Missionsbodensegment, in welchem auch EGNOS integriert ist, stellt den Betrieb des gesamten Systems sicher. Alle Elemente sind über ein GAN (*Global Area Network*) miteinander vernetzt. Hier werden die Daten von den globalen Stationen GMS (*Global Monitoring Stations*) empfangen. Im GNCC (*Global Navigation Control Center*) werden die Navigationsdaten bestehend aus Ephemeriden, Uhrparametern und globalen Integritätsinformationen berechnet und wieder über die ULS ausgesandt. Weitere regionale Komponenten außerhalb Europas dienen der Berechnung eigener Integritätsinformation. Dazu können regionale Monitorstationen RMS (*Regional Monitoring Stations*) und/oder regionale Rechenzentren zur Datenverarbeitung der GMS aufgebaut werden. Lokale Missionsbodensegmente dienen in räumlich begrenzten Anwendungen wie auf Flug- oder Seehäfen der Steigerung der Genauigkeit der Positionsbestimmung und der Integrität (TTA). Die EGNOS-Integration enthält die RIMS für die Erfassung der Beobachtungsdaten von GPS  $L_1$ ,  $L_2$ , GLONASS und EGNOS  $L_1$ . In den GMS werden die Signale von GALILEO und GPS  $L_5$  erfasst. Die Berechnungen der EGNOS-Produkte erfolgt in den GALILEO-GNCC, werden in die EGNOS-Nachricht integriert und über die NLES zu den geostationären Satelliten übertragen.

Die Studien zum Raumsegment (Benedicto u.a. 2000) ergaben neben speziellen Ergebnissen bezüglich des Bodenkontrollsystems, von Uhrentwicklungen (Rubidium, passiver Hydrogen Maser), der Hardware zur Signalerzeugung und der Satellitenantenne auch eine vor allem hinsichtlich der Verfügbarkeit (Ausfälle einzelner Satelliten) optimierten Konstellation. Diese besteht aus 30 MEOs (*Mean Earth Orbiter*) in drei Bahnebenen mit einer mittleren Bahnhöhe von 23222 km und einer Inklination von  $56^\circ$ . Mögliche Frequenzbänder für die GALILEO-Signale wurden auf

der Weltfunkkonferenz WRC2000 (*World Radio Conference*) festgelegt. Bis zu vier Trägerfrequenzen im L-Band sind vorgesehen. Zudem werden Überlegungen für das C-Band bezüglich des GAS-Dienstes angestellt. Die geplanten Signale müssen diversen Anforderungen genügen (Interferenzen zu GPS, Empfänger etc.), woraus sich - neben der Nutzung von den allokierten und zu GPS benachbarten Frequenzen (E1, E2, E4, E5, E6) - eine weitere besonders vorteilhafte Signalloption ergibt. So könnten, bei größerer Bandbreite, die gleichen Zentralfrequenzen wie  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_5$  von GPS genutzt werden, um eine höchstmögliche Kompatibilität zu GPS ohne Störungen, eine möglichst geringe Komplexität der Empfangssysteme und trotzdem eine Koexistenz mit militärischen Signalen zu erhalten (*Eisfeller u.a. 2000*). Ausstehende Entscheidungen über Finanzierung, zum Beispiel PPP (*Public Private Partnership*) und zu klärende Einwände des U.S. DoD wegen möglicher Szenarien bezüglich Signalen/Frequenzen und militärischer Nutzungen, haben den abschließenden Entschluss zum Aufbau des Systems mehrmals verzögert (*McDonald 2002*). Am 26. März 2002 hat der Rat der Verkehrsminister der EU die endgültige Entscheidung zum Aufbau des Systems gegeben und die Mittel für die Entwicklungsphase (bis 2005) freigegeben.

## 2.2 Potential für präzise GPS-Anwendungen

Alle Verbesserungen und Modernisierungen bezüglich Konstellation und Signalstruktur vom GPS oder eines anderen GNSS beeinflussen nicht nur Navigationsanwendungen. Sie haben auch eine direkte Verbindung zum Genauigkeitspotential der präzisen Positionsbestimmung mit Hilfe der genauen Phasenbeobachtungen. Neben den im vorherigen Abschnitt dargestellten Systementwicklungen sind auch auf anderen Gebieten immer wieder Meilensteine erkennbar, die das Potential hinsichtlich Genauigkeit, Verfügbarkeit, Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der Lösungen ständig verbessern (Abbildung 2.3).

Die Arten der Positionierung und der jeweiligen Auswertung (Abbildung 2.2) ergeben ein großes Spektrum von GPS-Anwendungen auf unterschiedlichen Genauigkeitsebenen und zeigen die Ansatzpunkte für Verbesserungen bei der Nutzung von Phasenbeobachtungen mit gelösten Mehrdeutigkeiten. Der Trend und die Anforderungen aus der Praxis gehen dabei speziell in Richtung von hochgenauen geodätischen Anwendungen über immer größere Entfernungen mit immer geringerem Aufwand. Das bedeutet kürzere Messzeiten bis hin zu Echtzeitverfahren bei gleichzeitig vermindertem Personal- und Geräteeinsatz. Schon vor einigen Jahren wurden Zentimetergenauigkeiten mit aus zwei Empfangsausrüstungen bestehenden RTK-Systemen (*Real-Time Kinematic*) im Basislinienmodus im Nahbereich (*Local Area Precise Differential GPS, LAPDGPS*) erreicht. Heute können bereits in regionalen Netzen die Rover-Koordinaten in Echtzeit mit Zentimetergenauigkeit bestimmt werden (*Regional Area Precise Differential GPS, RAPDGPS*), zum Beispiel im SAPOS<sup>®</sup>-Netz (*Jahn u.a. 2001*). Die Modellierung für vernetzte Referenzstationen hat sich in letzter Zeit - speziell für den Echtzeitbetrieb - erheblich verbessert, zum Beispiel *Wanninger (2000)* und *Wübbena u.a. (2001)*. Hier zeigen zukünftige und bereits begonnene Entwicklungen weiter in Richtung ausgedehnterer bis globaler Netze (*Global Precise Differential GPS, GPDGPS*). Dabei können anstatt geometrischer Messungskorrekturen Zustandsinformationen der einzelnen Fehlerkomponenten des Parametermodells zur Verfügung gestellt werden (*Muellerschoen u.a. 2001, Wübbena und Willgalis 2001*).

Das Erreichen neuer verbesserter Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten kann durch eine fortwährende aber zyklische Bearbeitung verschiedener Komponenten im GPS-Fehlerhaushalt beschrieben werden. Die Entwicklungen vom System, von genutzter Hardware, von Netzen und von Algorithmen sind ineinander verzahnt und voneinander abhängig bzw. bauen aufeinander auf

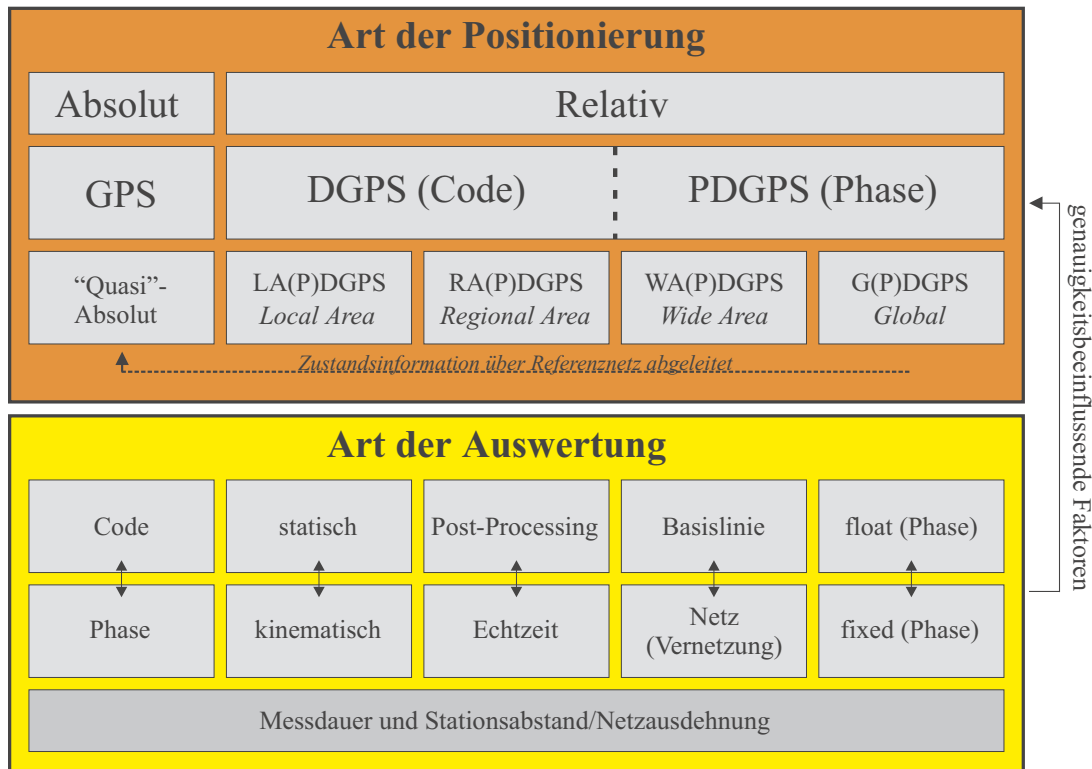


Abbildung 2.2: Zusammenstellung der Arten der GPS-Positionierung und der genauigkeitsrelevanten Einflussfaktoren der Auswertung.

(Abbildung 2.3). Detailliertere Überblicke der Entwicklungen finden sich u.a. in Wells (1986), Seeber (1993), und Teunissen und Kleusberg (1998).

Die beschriebenen Systementwicklungen von GPS/GNSS ergeben beispielsweise ein niedrigeres Rauschen, eine größere Signalleistung, eine größere Anzahl von Satelliten und Frequenzen. Dadurch ergeben sich Verbesserungen für Mehrdeutigkeitslösung und Phasen-Mehrwegeeffekte und somit Vorteile für Echtzeitanwendungen (Hein 2000). Auf Grund der großen Satellitenanzahl und der guten Geometrie von GPS + GALILEO zeigt sich zum Beispiel in Simulationen eine um den Faktor 2-3 verbesserte Genauigkeit und eine erhebliche Steigerung der Erfolgsrate für die richtige Mehrdeutigkeitsschätzung auf kurzen Basislinien (Eisfeller 2002).

Den Systementwicklungen, aber auch gestiegenen Nutzeranforderungen, müssen die Entwicklungen der genutzten Hardware folgen. Ausgehend von Einfrequenz- bzw. Zweifrequenz-Squaring-Empfängern mit Multiplextechnik entwickelten sich geodätische Empfangssysteme mit parallelen Eingangskanälen und einer rekonstruierten  $L_2$ -Phasenbeobachtung voller Wellenlänge auch unter A-S. Zukünftig wird es Hybridempfänger für diverse GNSS-Signale geben. Zusammen mit weiterentwickelten geodätischen Antennen werden auf diese Weise erst stabile Phasenbeobachtungen unter verschiedenen Bedingungen möglich und erlauben die Bildung von Linearkombinationen und verbesserten Auswertestrategien.

Der Aufbau von permanent betriebenen Netzen unterstützt die Forschung auf diversen Gebieten. Das globale Permanentnetz des IGS (International GPS Service) besteht zum Beispiel mittlerweile aus fast 200 Referenzstationen (IGS 2001) mit unterschiedlich stark verdichteten regionalen Teilnetzen. Die jährlichen Koordinatenlösungen leisten einen Beitrag zur Realisierung



des globalen Bezugsrahmens ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) und zur genauen Bestimmung von Erdrotationsparametern. Verschiedene Dienste stellen hochgenaue Bahn-, Uhr-, Ionosphären- und Troposphärenprodukte zur Verfügung. Der fortwährende Datenzugang erlaubt Weiterentwicklungen dieser Produkte hinsichtlich Genauigkeit und schnellerer Verfügbarkeit, aber auch Forschung im Bereich Geodynamik. Andere Referenznetze wie SAPOS<sup>®</sup> bilden landesweite Bezugssysteme und sind Basis einer ständigen Verbesserung von Echtzeitentwicklungen wie der Vernetzung (siehe oben). Die Nutzung permanenter Referenzstationen mit unterschiedlichen Empfangssystemen hat u.a. die Notwendigkeit der Antennenkalibrierung bewusst gemacht.

Entwicklungen in den genannten Bereichen bilden wiederum die Grundlage für Verbesserungen von Algorithmen und Modellen. Dies betrifft besonders die Möglichkeiten für die Mehrdeutigkeitssuche (z.B. *Teunissen 1998*), speziell im Bereich der kinematischen Positionsbestimmung bzw. einer instantanen Mehrdeutigkeitslösung. Ebenso sind Modellverbesserungen im gesamten GPS-Fehlerhaushalt wie jene für die entfernungs- und die stationsabhängigen Fehleranteile betroffen. Ferner gehören in diesen Bereich auch andere technische Entwicklungen wie zum Beispiel die Standardisierung der Beobachtungsdaten- bzw. Korrekturdatenübermittlung mit RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) oder RTCM SC 104 (*Radio Technical Commission For Maritime Services, Special Committee No. 104*).



Abbildung 2.3: Beispiele für Entwicklungen des GPS-Systems, präziser GPS-Anwendungen, ihrer Zusammenhänge und Abhängigkeiten.

Es wird deutlich, dass sich eine rasante Entwicklung bei der hochpräzisen GPS- bzw. GNSS-Positionsbestimmung vollzogen hat und weiterhin vollzieht. Seit Anfang der Achtziger Jahre hat sich eine Steigerung der Basisliniengenauigkeit von  $1 - 2 \cdot 10^{-6}$  (1 ppm) in Richtung von  $1 \cdot 10^{-9}$  (1 ppb) für die Horizontalkomponente vollzogen (*Bock 1998*). Es kann global - in Bezug auf ein konsistentes terrestrisches Referenzsystem - eine instantane Koordinatengenauigkeit von 10-20 mm erwartet werden. Für Langzeitbeobachtungen und spezielle Verfahren im lokalen bzw. regionalen Bereich kann Millimetergenauigkeit erreicht werden. Trotz Verbesserung der vertikalen Komponente muss immer von einer drei- bis vierfach schlechteren Höhengenuigkeit im Vergleich zur Lage ausgegangen werden.

Verstärkte Entwicklungen fanden bislang bei den Modellen für die entfernungsabhängigen Fehler statt (Ionosphäre, Troposphäre, Orbits). Für weitere Genauigkeitssteigerungen verbleiben speziell die stationsabhängigen Fehler und notwendige weitere Entwicklungen hinsichtlich einer präzisen Bestimmung der Höhenkomponente. Als besondere Problematik besteht hier, dass die Höhe stark mit der Troposphärenmodellierung und somit auch mit den Phasenzentrumsvariationen (Abschnitt 3.3) korreliert ist. Die Höhenbestimmung wird aber immer wichtiger in großräumigen Anwendungen und dabei auch für verkürzte Beobachtungszeiten. Neben Geodynamik und Deformationsmessungen fordern speziell Verfahren zur Kombination von GPS und Geoid eine hohe Präzision, zum Beispiel das GPS-Nivellement und auch die Anbindung von Pegelsystemen zur Schaffung überregionaler und sogar globaler Höhenbezugssysteme bzw. zur Meeresspiegelbeobachtung.

Insbesondere die Kenntnis der systematisch wirkenden PCV ist wichtig für den Zugang zum Millimeter-Bereich. In den letzten 10-15 Jahren wurden hier enorme Entwicklungen der Kalibrierungsverfahren vollzogen (vgl. Kapitel 5). Obwohl bereits Mitte der Achtziger Jahre die Größenordnungen der möglichen Antennenfehler erkannt wurden (*Sims 1985*), entwickelten sich erst später - nach und parallel zu Verbesserungen an anderen Stellen im GPS-Fehlerhaushalt - operationelle Kalibrierungsverfahren im Feld, die über eine reine Offset-Bestimmung hinausgehen. Die PCV sind heute ein entscheidender Punkt zur Ausschöpfung des Genauigkeitspotentials von GPS (*Campbell 1996*). Diese Schwierigkeiten verhindern trotz der hohen Auflösung der Phasenbeobachtung unter anderem, dass GPS ein wirklich universales Messinstrument im Millimeterbereich ist (*Leick 1995*).

## Kapitel 3

# Grundlagen und Stand der präzisen Positionsbestimmung mit GPS

Die breite Darstellung der Problematik der Phasenzentrumsvariationen in dieser Arbeit muss in den Rahmen des gesamten GPS-Fehlerbudgets eingebettet werden. Voraussetzung für eine hochpräzise Positionsbestimmung ist die exakte Kenntnis der PCV. Um diesen Effekt in den kompletten Fehlerhaushalt einordnen, Korrelationen zu anderen Parametern herstellen und mögliche Verbesserungen in hochgenauen Anwendungen abschätzen zu können, werden im folgenden Kapitel die verschiedenen GPS-Fehlereinflüsse in Übersichtsform dargestellt. Teilweise werden aktuelle Verfahren zur Elimination bzw. Berechnung der jeweiligen Parameter dargestellt, die den heutigen Stand für die hochgenaue Koordinatenbestimmung aufzeigen. Eine exakte Beschreibung der Grundlagen des Antennenempfangsverhalten folgt im separaten Kapitel 4. Der Darstellung des GPS-Fehlerhaushaltes werden Grundlagen zum Beobachtungsmodell vorangestellt.

### 3.1 GPS-Beobachtungsmodell

Für die hochpräzise Positionsbestimmung ist die Nutzung der Phasenbeobachtung erforderlich. Im Gegensatz zur Auflösung der Codephase im Dezimeterbereich lässt sich die Trägerphase auf mindestens 3 mm oder besser auflösen (*ARINC 1991*), was mit moderner Hardware-Technologie auch erreicht werden kann. Die Messgröße im Empfänger ist eine Überlagerung eines empfangenen mit einem empfängerseitig generierten Signal. Es kann nur ein Phasenreststück zwischen diesen beiden und - über den integrierten Doppler-Count - die der Entfernungsänderung zwischen Satellit und Empfänger entsprechenden vollen Anzahl von Zyklen seit erstmaliger Signalerfassung gemessen werden. Die Anzahl der ganzzahligen Wellenlängen zu Beginn jeder neuen Signalerfassung ist vorerst unbekannt. Dieser Mehrdeutigkeitsterm wird später als Parameter für jeden Beobachtungsblock mit kontinuierlichen Phasenmessungen mitgeschätzt.

Die *Carrier Beat Phase*  $\phi_i^k$  (*Wells 1986*) ist die Differenz zwischen dem zur Empfangszeit generierten Signal  $\phi_i(T)$  und dem eintreffenden, dopplerverschobenen Satellitensignal  $\phi^k(t)$  mit Bezug zum Aussendezeitpunkt. Zusammen mit der Mehrdeutigkeit  $N_i^k$  ergibt sich für die **Trägerphasenmessung**:

$$\phi_i^k = \phi_i(T) - \phi^k(t) + N_i^k + \varepsilon_i^k. \quad (3.1)$$

Nach der Übertragung in den GPS-Zeitrahmen  $\tau$  analog zu (2.2) mit der fundamentalen Beziehung zwischen Aussende- und Empfangszeitpunkt (Vernachlässigung von Laufzeitverzögerungen in der Atmosphäre u.a.) und entsprechenden Umstellungen

$$\tau^k + \frac{\rho_i^k}{c_0} = \tau_i \quad (3.2)$$

$$t^k + dt^k + \frac{\rho_i^k}{c_0} = T_i + dT_i \quad (3.3)$$

erhält man

$$\phi_i^k = \phi_i(\tau_i - dT_i) - \phi^k(\tau^k - dt^k) + N_i^k + \varepsilon_i^k. \quad (3.4)$$

Mit den über einen kurzen Zeitraum für hochstabile Oszillatoren geltenden grundsätzlichen Beziehungen und Umformungen  $\Delta t = T - t$  und

$$\phi(T) - \phi(t) = f \cdot (T - t) = f \cdot \Delta t \quad (3.5)$$

$$\phi(t + \Delta t) = \phi(T) = \phi(t) + f \cdot \Delta t \quad (3.6)$$

folgt aus (3.4)

$$\begin{aligned} \phi_i^k &= \phi_i(\tau_i) - f \cdot dT_i - \phi^k(\tau^k) + f \cdot dt^k + N_i^k + \varepsilon_i^k \\ &= \phi_i(\tau_i) - \phi^k(\tau^k) + f \cdot (dt^k - dT_i) + N_i^k + \varepsilon_i^k \\ &= f \cdot (\tau_i - \tau^k) + f \cdot (dt^k - dT_i) + N_i^k + \varepsilon_i^k. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Mit  $\lambda \cdot f = c_0$  ergibt sich für eine Trägerphasenmessung (metrisch):

$$\Phi_i^k = PR_i^k = \rho_i^k + c_0 \cdot (dt^k - dT_i) + \lambda \cdot N_i^k + \varepsilon_i^k. \quad (3.8)$$

(3.8) muss noch um die entfernungsabhängigen Fehlerterme der Ionosphäre  $d_{Ion}$ , der Troposphäre  $d_{Trop}$  und der Bahnbestimmung  $d_{Orb}$  erweitert werden. Weiterhin ist noch eine Vervollständigung hinsichtlich der stationsabhängigen Fehler Empfänger-PCV  $d_{PCV_{rcv}}$  und Empfänger-Multipath  $d_{MP_{rcv}}$  notwendig.

$$\begin{aligned}
\Phi_i^k = PR_i^k &= \rho_i^k + c_0 \cdot (dt^k - dT_i) + \lambda \cdot N_i^k \\
&- d_{Ion_i^k} + d_{Trop_i^k} + d_{Orb_i^k} \\
&+ d_{PCV_{rcv}_i^k} + d_{MP_{rcv}_i^k} + \varepsilon_i^k.
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Die Fehlerterme können in drei Blöcke eingeteilt werden. Der erste Block beinhaltet die uhrbezogenen Fehler  $dC_i^k$ , zu denen zusätzlich die instrumentellen Laufzeitverzögerungen (Hardwaredelays) in Satellit und Empfänger gehören. Der zweite Block beschreibt die entfernungsabhängigen Fehler  $dD_i^k$ . Relativistische Effekte sind hier nicht angegeben. Die Darstellung der stationsabhängigen Anteile  $dS_i^k$  muss weiterhin um Antennen- und Mehrwegefehler am Satelliten erweitert werden. Gekürzt ergibt sich die **vollständige Beobachtungsgleichung** zu

$$PR_i^k = \rho_i^k + dC_i^k + dD_i^k + dS_i^k + \lambda \cdot N_i^k + \varepsilon_i^k. \tag{3.10}$$

Diese wird zum Beispiel für diverse Auswertungsalgorithmen durch **Differenzbildung** verändert. In der undifferenzierten Beobachtungsgleichung ist die Mehrdeutigkeit  $N_i^k$  nicht ganzzahlig, da sich das Satellitensignal zum Aussendezeitpunkt und das im Empfänger generierte Trägersignal zum Empfangszeitpunkt jeweils nicht in Phasennulllage befinden. Für Messungen im Relativmodus und für bestimmte Auswertemodelle können nun aus (3.9) bzw. (3.10) Einfache Differenzen (*Single Differences SD*)

$$\begin{aligned}
\Delta \Phi_{ij}^k &= \Phi_j^k - \Phi_i^k \\
&= \Delta \rho_{ij}^k + c_0 \cdot (dT_i - dT_j) + \Delta dD_{ij}^k + \Delta dS_{ij}^k \\
&+ \lambda \cdot \Delta N_{ij}^k + \varepsilon_{ij}^k
\end{aligned} \tag{3.11}$$

zwischen zwei Stationen  $i, j$  gebildet werden. Dadurch werden der Uhrfehler und die Hardwaredelays des Satelliten  $k$  eliminiert. Die Effekte durch Orbit- und Atmosphärenfehler werden in Abhängigkeit von der Basislinienlänge reduziert. Bei kurzen Entfernungen werden sie praktisch eliminiert, ebenso wie der Antennenfehler bei gleichorientierten und identischen Antennen. Es tritt allerdings der Effekt einer fehlerbehafteten Absolutlagerung auf die Relativlösung als zusätzlicher Fehler auf. Dieser wirkt ähnlich wie der Effekt eines Bahnfehlers, aber ist im Gegensatz zu den sich ändernden Bahnfehlern konstant mit entsprechend großer systematischer Wirkung (*Völksen 2000*). Der Mehrdeutigkeitsterm  $\Delta N_{ij}^k$  ist noch nicht ganzzahlig. Dies ändert sich nach einer weiteren Differenzbildung zwischen SD in den Doppelten Differenzen (*Double Differences DD*)

$$\begin{aligned}
\nabla \Delta \Phi_{ij}^{kl} &= \Delta \Phi_{ij}^l - \Delta \Phi_{ij}^k \\
&= \nabla \Delta \rho_{ij}^{kl} + \nabla \Delta dD_{ij}^{kl} + \nabla \Delta dS_{ij}^{kl} \\
&+ \lambda \cdot \nabla \Delta N_{ij}^{kl} + \varepsilon_{ij}^{kl}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

für  $\nabla\Delta N_{ij}^{kl}$ . Die Uhrfehler und Hardware delays im Empfänger werden zusätzlich beseitigt. Auf kurzer Basis - wieder mit gleichorientierten und identischen Antennen - verbleiben somit prinzipiell als Unbekannte nur noch die Koordinaten und die zu lösenden Mehrdeutigkeiten, gestört vor allem durch auftretende Mehrwegeeffekte. Dies wird u.a. bei der geometrischen Mehrdeutigkeitsbestimmung durch Einführung genauer Basislinienkomponenten genutzt. In Epochendifferenzen zwischen DD, den Dreifachen Differenzen (*Triple Differences TD*), verbleiben nach dem Wegfall der Mehrdeutigkeiten in genannten kurzen Basislinien nur noch der Mehrwegefehler und das Messrauschen. Diese Größe ist speziell für die Detektion und Bereinigung von Phasensprüngen (*Cycle Slips*) geeignet.

Neben der Differenzbildung ist, sofern Phasenmessungen auf zwei bzw. zukünftig mehr Frequenzen vorhanden sind (analog für Codemessungen), auch die Bildung einer Vielzahl von **Linearkombinationen** möglich. Dies ist für die Mehrdeutigkeits- und Koordinatenbestimmung von Bedeutung, da sich die Eigenschaften von Linearkombinationen hinsichtlich ihrer Wellenlänge, ihrer Beeinflussung durch die Ionosphäre und ihres Messrauschens im Vergleich zu den  $L_1$ -,  $L_2$ -Originalsignalen stark verändern können. Aus der Multiplikation der Phasenmessungen von  $L_1$  und  $L_2$  mit den Linearfaktoren  $n, m$  ergeben sich die Linearkombinationen der Phasenmessung in Zyklen (*Wübbena 1989*) zu

$$\phi_{n,m} = n \cdot \phi_1 + m \cdot \phi_2. \quad (3.13)$$

Die Wellenlänge der Linearkombination lässt sich mit der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  und den Originalfrequenzen  $f_1, f_2$  zu

$$\lambda_{n,m} = \frac{c_0}{n \cdot f_1 + m \cdot f_2}. \quad (3.14)$$

berechnen, wobei Wellenlängen von vielfacher Größe der Originalsignale gebildet werden können. Schließlich ergibt sich die Mehrdeutigkeit der Linearkombination zu

$$N_{n,m} = n \cdot N_1 + m \cdot N_2. \quad (3.15)$$

Somit sind bei der Nutzung von ganzzahligen Linearkoeffizienten auch die entsprechenden Mehrdeutigkeiten der Linearkombinationen ganzzahlig. Die Mehrdeutigkeitslösung von zwei Signalen bedingt jeweils automatisch gelöste Mehrdeutigkeiten für alle anderen. Zwei weitere wichtige Größen in diesem System sind der ionosphärische Verstärkungsfaktor

$$V_{I,n,m} = \frac{n \cdot f_2 + m \cdot f_1}{n \cdot f_1 + m \cdot f_2}, \quad (3.16)$$

und das Verhältnis von  $V_{I,n,m}$  zur Wellenlänge  $\lambda_{n,m}$  (Wanninger 1994), wobei erstere den ionosphärischen Einfluss auf die Koordinaten- und letztere auf die Mehrdeutigkeitslösung beschreibt. Prinzipiell könnten auf diese Weise eine unendliche Anzahl von Linearkombinationen gebildet werden. Eine sinnvolle Auswahl geschieht über die Nutzung von Signalen mit bestimmten Eigenschaften (Beeinflussung durch Ionosphäre, große oder kleine Wellenlänge, Messrauschen etc.), die vorteilhaft für Mehrdeutigkeits- und Koordinatenbestimmung sind. Dabei ist auch bedeutsam, dass es nach Lösung einer Linearkombination auf Grund der Ganzzahligkeit der Mehrdeutigkeiten zu Abhängigkeiten und Auswirkungen für andere Signale kommt, u.a. zu veränderten sog. effektiven Wellenlängen. Details und Übersichten zur Bildung von Linearkombinationen und der besonderen Verwendung für die Mehrdeutigkeitsbestimmung finden sich zum Beispiel in Wübbena (1991), Wanninger (2000). Zukünftig sind zudem durch das Vorhandensein von drei Frequenzen und der auf diese Weise noch größeren Möglichkeiten zur Bildung von Linearkombinationen weitere Vorteile für die Mehrdeutigkeitsbestimmung zu erwarten (Hatch u.a. 2000).

Die **Lösung des Mehrdeutigkeitsproblems** ist die Hauptvoraussetzung für eine hochpräzise Positionsbestimmung. Unter Vernachlässigung weiterer Fehlerquellen setzt sich die Standardabweichung bzw. Varianz der Beobachtungen

$$\sigma_{l(n,m)}^2 = \lambda_{n,m}^2 \cdot (n^2 + m^2) \cdot (\sigma_{N_{n,m}}^2 + \sigma_{\phi}^2) \quad (3.17)$$

über Fehlerfortpflanzung aus dem Phasemessrauschen  $\sigma_{\phi}$  und den Varianzen der Mehrdeutigkeiten  $\sigma_N$  zusammen, aus der sich - siehe auch (4.53) - durch Multiplikation mit dem PDOP der mittlere Punktfehler ergibt. Es wird deutlich, dass sich dieser nach Festsetzung ganzzahliger Mehrdeutigkeiten ( $\sigma_N = 0$ ) stark reduziert. Bei den Verfahren zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten wird normalerweise zwischen geometrischen Methoden, Methoden mit Hilfe des Code-Trägerphasenvergleichs, Mehrdeutigkeitssuchmethoden und Kombinationen dieser Methoden unterschieden (Seeber 1993). Je nach Messzeit, Entfernung, Konstellation, atmosphärischen Störungen etc. lassen sich nun verschiedene - iterative und simultane - Vorgehensweisen anwenden. Dabei erleichtern kleine Messfehler die Lösung, zum Beispiel nur geringe atmosphärische Störungen für Suchverfahren bei kurzen Basislinien. In die gleiche Kategorie fallen auch die in dieser Arbeit behandelten Phasenzentrumsfehler, deren systematischer Einfluss für eine schnelle und zuverlässige Mehrdeutigkeits- und Koordinatenlösung in jedem Fall beseitigt werden muss (Abschnitt 4.5). Für Details wird an dieser Stelle auf Übersichten inklusive der entsprechenden Literaturangaben wie Wübbena (1991), Hatch und Euler (1994), Han und Rizos (1997), Teunissen (1998) u.v.a. verwiesen.

Die **Auswertekonzepte** innerhalb von GPS-Auswerteprogrammen verwenden vielfach das Modell der Parameterelimination. Dabei werden die Doppelten Differenzen als Eingangsbeobachtungsgröße und somit die Ganzzahligkeit ihrer Mehrdeutigkeiten genutzt. Es müssen dann keine Uhrfehler mehr geschätzt werden, womit sich die Anzahl der unbekannt Parameter reduziert. Allerdings müssen durch spezielle Algorithmen Basislinien gebildet werden, wobei sich bei  $R$  Empfängern,  $S$  Satelliten und  $T$  Epochen  $(R - 1) \cdot (S - 1) \cdot T$  linear unabhängige Beobachtungen ergeben. Durch die Auswahl kann Informationsgehalt verloren gehen. Weiterhin entstehen algebraische Korrelationen durch die Differenzbildung, was bei der Berechnung der Kovarianzmatrix beachtet werden muss (Beutler u.a. 1987). Allgemein ist die Modellierung von Prozessen schwieriger als im undifferenzierten Modus, da absolute Fehler eliminiert und die Differenzen verarbeitet werden müssen. Dieses Beobachtungsmodell wird zum Beispiel erfolgreich in

den Auswerteprogrammen Bernese (*Hugentobler u.a. 2001b*) und GAMIT (*King und Bock 1998*) eingesetzt.

Ebenso können Einfache Differenzen oder undifferenzierte Phasenmessungen als Beobachtungsgrößen genutzt werden. Das Konzept der Parameterschätzung in Form der Prozessierung undifferenzierter Beobachtungen wurde bereits zeitlich früh in der Entwicklung der hochpräzisen GPS-Auswertung eingeführt (*Goad 1985*). Vorteile sind vor allem die Verwendung sämtlicher Beobachtungsdaten in einer Multi-Stations-Auswertung und die einfache Modellierung physikalischer Korrelationen. Die Anfangsproblematik dieser Methode ist ein auftretender Rangdefekt im Normalgleichungssystem von  $(R + S + T - 1)$  (*Grant u.a. 1990*). Eine Trennung der linear abhängigen Uhrfehler bzw. Hardwaredelays und Mehrdeutigkeiten ist nicht möglich. Es muss vorab über bestimmte Uhr- bzw. Mehrdeutigkeitsparameter in der Art verfügt werden, dass der Defekt gerade aufgehoben wird. Zur Beseitigung der Singularität kann beispielsweise eine Empfängeruhr als Unbekannte ausgenommen und anschließend noch einige Mehrdeutigkeiten vorab zu ganzzahligen Werten festgelegt werden (*Wanninger 2000*). Entsprechend können a priori hohe Gewichte oder Varianzen für einige Parameter, zum Beispiel für Satellitenuhrfehler bzw. Hardwaredelay, eingeführt und Näherungswerte für Mehrdeutigkeiten aus Code-Beobachtungen genutzt werden (*Wübbena 1991*). Nach der Schätzung der Uhrfehler liegen letztlich ganzzahlige Mehrdeutigkeiten analog zu denen aus Doppelten Differenzen vor. Die Parameterschätzung wird ebenso erfolgreich in den Programmsystemen GIPSY/OASIS (*Webb und Zumberge 1997*) und GEONAP (*Wübbena 1989*) verwendet. GEONAP bzw. das entsprechende Echtzeitsystem GNRT/GNNET (*Wübbena u.a. 2001a*) wurde in dieser Arbeit im Rahmen der Entwicklung der Absoluten Feldkalibrierung und weiterer Auswertungen hauptsächlich eingesetzt.

### 3.2 Das Fehlerbudget von GPS

Tabelle 3.1: Hauptfehlerquellen für die hochpräzise GPS-Positionsbestimmung mit Trägerphasen.

Fehlerquelle	absoluter Effekt	relativer Effekt
Entfernungsabhängige Fehler		
Orbit (Broadcast)	5-50 m	0.5-2 ppm
Ionosphäre	0.5-100 m	0.1-50 ppm
Troposphäre	0.01-0.4 m	0.1-2 ppm
Stationsabhängige Fehler (Originalsignale)		
Mehrwegefehler (Empfänger)	mm-cm	mm-cm
PCV (Empfänger)	mm-cm	mm-cm
Messrauschen	$\leq 3$ mm	$\leq 4$ mm

In Tabelle 3.1 sind wesentliche wirksame Fehler bzw. Restfehler zusammengefasst, die bei der hochpräzisen Positionsbestimmung mit Trägerphasen relevant sind. Die Angaben geben die mögliche Größenordnung der Effekte wieder, wobei sehr günstige bzw. extreme Verhältnisse stark variieren können. Die wichtigen entfernungsabhängigen Fehler Bahn, Ionosphäre und Troposphäre, sowie die stationsabhängigen Systematiken werden im nächsten Abschnitt näher beschrieben. Die Uhrfehler und instrumentellen Signalverzögerungen von Satellit und Empfänger werden nicht explizit dargestellt. Innerhalb von undifferenziert arbeitender GPS-Software können die nach der Uhrkorrektion aus der Broadcast-Message verbleibenden Satellitenuhrfehler pro Epoche geschätzt werden. Nach dem Abschalten von SA ist eine Uhrbeschreibung durch ein Modell wieder möglich.



Im IGS werden mittlerweile standardmäßig Uhlösungen berechnet, die im Post-Processing eingeführt werden können. Verzögerungen in der Hardware des Satelliten sind absolut nicht bekannt (*Wübbena 2001*). Für Einfrequenznutzer wird pro Satellit ein Parameter für die Verzögerung des  $L_1$ -C/A-Codes in der Broadcast-Message mitgeteilt. Gruppenverzögerungen der Codes auf beiden Frequenzen sind in der Modellierung der Uhr enthalten. Im IGS wird operationell noch eine Verzögerung zwischen C/A- und P-Code für  $L_1$  gerechnet. Uhr und Hardware delays der Empfänger können und müssen wieder in undifferenzierter Software modelliert werden. Die internen Uhren weisen eine schlechte Langzeitstabilität auf und werden somit nicht durch Modelle sondern durch Epochenparameter ausgeglichen. In modernen Empfängern können Unterschiede der instrumentellen Verzögerungen für eine Frequenz zwischen den Kanälen praktisch vernachlässigt werden bzw. werden in einer Selbstkalibrierung bestimmt, sodass prinzipiell jeweils nur noch ein gemeinsamer Uhrparameter pro Epoche bestimmt werden muss. Bei der Verarbeitung von Signalen verschiedener Frequenzen trifft dies nicht mehr zu, und ein entsprechender Fehler muss berücksichtigt werden.

Scheinbar triviale Fehler durch Aufbau, Bestimmung von Exzentrizitäten, Antennenausrichtung etc. müssen nicht gesondert aufgeführt werden, sind aber von höchster Wichtigkeit für das Erreichen einer Genauigkeitsstufe im Bereich von Millimetern im Koordinatenraum. Unterschiede zwischen Lösungen gleichen Beobachtungsmaterials, aber verschiedener Auswerter, können unter dem Begriff Auswerte-Rauschen (*process noise*) subsumiert werden, was individuelle Unterschiede bei der Datenbehandlung wie die Wahl der Software (*software noise*), die Wahl der Auswerteparameter (*operator noise*) und die Wahl von bestimmten Referenzkoordinaten als sog. *Fiducials* beschreibt (*Dietrich u.a. 2001*). Diese Differenzen spiegeln sich vor allem bei der Prozessierung globaler Netze wider.

### 3.2.1 Entfernungabhängige Fehler

Für die relative GPS-Positionsbestimmung wurden bereits früh während des ständig fortschreitenden Entwicklungsprozesses von System und Auswertemodellen nach Formeln gesucht, die eine Abschätzung der Basisliniengenauigkeit in Abhängigkeit von Basislinienlänge und/oder Bahnfehlern erlauben (*Völksen 2000*). Fehler durch die atmosphärische Ausbreitungsverzögerung und die Bahnen haben mit zunehmender Basislinienlänge einen größeren Effekt. Bei den atmosphärischen Effekten ist dies vor allem durch die - bei wachsender Basislänge - zunehmende Dekorrelation der Fehler durch unterschiedliche Verhältnisse begründet.

#### Bahnfehler

Der Bahnfehler  $d_{Orb\ i^k}$  als Range-Fehler ist die Abbildung eines Fehlervektors  $\mathbf{do}$  des GPS-Orbits auf die Verbindung  $\mathbf{R}_{i^k}$  zwischen Empfänger  $i$  und Satellit  $k$ :

$$d_{Orb\ i^k} = \frac{\mathbf{R}_{i^k}}{|\mathbf{R}_{i^k}|} \cdot \mathbf{do}. \quad (3.18)$$

Dabei ist  $|\mathbf{R}_{i^k}| = \rho_{i^k}$  analog zu (3.8). Für eine Abschätzung der Auswirkung  $db$  auf eine Basislinie  $b$  gibt *Bauersima (1983)* an:

$$\frac{db}{b} = \frac{d_{Orb}}{\rho}. \quad (3.19)$$

Allgemein gilt diese Formel besonders für längere Entfernungen und für Langzeitbeobachtungen als zu pessimistisch, da sich die Auswertalgorithmen mittlerweile wesentlich verbessert haben. Das berücksichtigt zum Beispiel bereits *Zielinski (1988)* durch Multiplikation von  $\rho$  mit einem Faktor ( $4 < k < 10$ ). (3.19) kann als gute Faustformel angenommen werden, sofern lediglich die Höhenkomponente betrachtet wird. Die Fehler der vom Kontrollsegment aus Code-Beobachtungen berechneten und prädizierten *Broadcast Ephemeris (BE)* liegen heute meist auf einem Niveau von nur wenigen Metern (*Zumberge und Bertiger 1996*), wobei für einzelne Satelliten im Vergleich zu den *Precise Ephemeris (PE)* vereinzelte Fehler von 30-50 m zu finden sind (*Wanninger 2000*). Der Effekt im Koordinatenraum ist bei kurzen Basislinien praktisch zu vernachlässigen, spielt aber für hochgenaue Anwendungen für Entfernungen ab 10-20 km eine Rolle.

Vom IGS werden standardmäßig von den Analysezentren gerechnete und über Helmert-Transformationen kombinierte präzise, schnelle und prädizierte Bahnlösungen (*Precise, Rapid, Predicted IGS-Orbits*) zur Verfügung gestellt (*IGS 2001*). Die präzisen Bahnen sind bereits in weniger als zwei Wochen nach dem Beobachtungstag zu erhalten und weisen eine aus den Residuen der Kombinationslösung abgeleitete Genauigkeit von besser als 1 dm auf. Die Genauigkeit der bereits am Folgetag verfügbaren (*rapid IGS-orbits*) liegt nur unwesentlich schlechter. Die prädizierten Lösungen weisen ein Genauigkeitsniveau ähnlich den Bahnen aus der Navigationsnachricht oder besser auf. Für die allgemeine Theorie der Bahnbestimmung wird an dieser Stelle beispielsweise auf *Montenbruck und Gill (2000)* u.a. verwiesen.

### Ionosphärische Refraktion

Der nach dem Abschalten von SA wieder dominierende Punkt im GPS-Fehlerhaushalt betrifft die dispersiven Laufzeitverzögerungen und die Strahlkrümmung von Mikrowellen in der Ionosphäre. Diese wird typischerweise als der Bereich der oberen Atmosphäre beschrieben, in welcher ionisierbare Gase - durch Sonnenstrahlung aufgespaltene freie Ionen und Elektronen - die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beeinflussen. Sie erstreckt sich über einen Bereich von 50 km Höhe bis zu mehreren Erdradien (*Davies 1990*), mit einem maximalen Elektronengehalt zwischen 250 und 500 km und dann mit zunehmender Höhe kontinuierlich abnehmender Elektronendichte. Dabei wird die Variabilität der Laufzeitverzögerungen in Summe durch den Bereich mit höherer Elektronendichte unterhalb von 2000 km (Faraday Elektronengehalt) und den Bereich darüber mit geringer Dichte und kleineren Variationen (Plasmasphäre) bestimmt (*Klobuchar 1996*).

Neben der Höhe wird die Ionosphäre in Abhängigkeit von Elektronendichte und auftretenden Signalstörungen noch räumlich nach magnetischer Breite in geographische Regionen strukturiert. Zudem variieren die absolute Elektronendichte und Störungen tages- und jahreszeitlich und sind hoch mit magnetischen Stürmen und dem 11-jährigen Sonnenzyklus korreliert. Absolute Unterschiede der Elektronendichte verschiedener Regionen werden nicht als Störungen bezeichnet, sondern können große horizontale Gradienten erzeugen, die bei Einfrequenzmessungen extreme entfernungsabhängige Fehler bewirken. Störungen hingegen sind räumlich und zeitlich stark strukturierte und sich verändernde Bereiche unterschiedlicher Elektronendichte. Dies sind zum Beispiel die sog. wandernden ionosphärischen Störungen verschiedener Größe (*Travelling Ionospheric Disturbances TIDs, Large Scale LSTIDs, Mean Scale MSTIDs*) und kleinräumige Störungen, die zu Phasen- und Amplitudenzintillationen bis hin zum Signalverlust führen (*Wanninger 1994*). Beide Effekte können bereits in kleinen und regionalen Netzen zu Problemen mit einer schnellen und zuverlässigen Mehrdeutigkeits- und Koordinatenlösung führen, speziell bei Kurzzeitmessungen.

Die Ionosphäre als dispersives Medium für Radiowellen bedeutet für den Brechungsindex und die resultierenden Laufzeitverzögerungen eine Abhängigkeit von der Frequenz. Für ein monochroma-

tisches Signal mit einer Frequenz  $f$  größer als 100 MHz ergibt sich der Phasenbrechungsindex nach *Hartmann und Leitinger (1984)* und einer Reihenentwicklung zu

$$n_{ph} = 1 - 40.3 \cdot \frac{N_e}{f^2} \pm \dots \quad (3.20)$$

Dabei ist der erste quadratische Term nur von der in der Konstanten enthaltenen sog. Plasmafrequenz und von der Elektronendichte  $N_e$  entlang des Ausbreitungsweges abhängig. Die Reihenentwicklung wird danach abgebrochen, da der erste Term ungefähr dreimal so groß wie die folgenden ist. Der Brechungsindex für eine Wellengruppe unterscheidet sich von (3.20) insofern, dass er immer größer als 1 ist. Daraus folgt das unterschiedliche Vorzeichen für die - im Term erster Ordnung - gleiche ionosphärische Korrektur für Code- (Verzögerung) und Phasenbeobachtungen (Beschleunigung). Der ionosphärische Einfluss als Term erster Ordnung [m]

$$\begin{aligned} d_{Ion} &= \frac{40.3}{f^2} \cdot TEC = \frac{40.3}{f^2} \int_i^k N_e(s) ds \\ &\approx \frac{40.3}{f^2} \cdot F \int_0^{h_k} N_e(h) dh = \frac{40.3}{f^2} \cdot F \cdot VTEC \end{aligned} \quad (3.21)$$

verhält sich somit proportional zur integrierten Elektronendichte *TEC* (*Total Electron Content*) entlang des Signalweges zwischen Satellit  $k$  und Empfänger  $i$ , welcher sich durch eine Modellbildung in einer sphärisch geschichteten Ionosphäre näherungsweise durch Multiplikation einer *Mapping*-Funktion  $F$  aus dem vertikalen Elektronengehalt *VTEC* ergibt (*Wanninger 1994*). Aus Zweifrequenzmessungen lassen sich  $d_{Ion}$  bzw. (V)TEC direkt ableiten und als Korrekturwerte bzw. für Modellierungszwecke verwenden. Eine allgemeine Formulierung für die erste Frequenz ergibt:

$$d_{Ion 1} = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (d_{Ion 1} - d_{Ion 2}) = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (PR_1 - PR_2). \quad (3.22)$$

Der Übergang in (3.22) auf die Entfernungsmessungen *PR* bedingt bis auf  $d_{Ion}$  gleiche Fehleranteile auf beiden Frequenzen. Dies gilt u.a. auf Grund der vorhandenen frequenzbezogenen Hardware delays und Mehrwegeeffekte und der Terme höherer Ordnung nicht streng, kann aber speziell für differentielle Messverfahren vernachlässigt werden. (3.22) ist Grundlage für die Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination  $L_0$  (4.52). Bei sehr geringer Wellenlänge gilt für sie  $V_{I,n,m} = V_{I,n,m}/\lambda = 0$ . Es werden jedoch gleichzeitig zufällige Messfehler verstärkt.

Die Ableitung von Ionosphärenmodellen aus Zweifrequenzbeobachtungen setzt die Bestimmung der instrumentellen Laufzeitverzögerungen in Satellit und Empfänger voraus. Bei diesen sog. *Single-Layer* Modellen wird der gesamte Elektronengehalt in einer Schicht in mittlerer Ionosphärenhöhe angenommen und räumlich über Polynome, Kugelfunktionsentwicklungen oder Interpolationsalgorithmen modelliert. Beispielsweise dienen die prädierten Koeffizienten des globalen

Klobuchar-Modells in der Navigations-Message von GPS (*ARINC 1991*) der Echtzeitkorrektur von Einfrequenzmessungen, weisen aber für hochgenaue Anwendungen zu große Unsicherheiten auf. Vor allem das *Mapping* in niedrige Elevationsbereiche bereitet Probleme. Aus globalen bzw. überregionalen Referenznetzen abgeleitete Echtzeitmodelle können u.a. für WADGPS-Anwendungen eingesetzt werden. Für die hochpräzise Koordinatenbestimmung mit Trägerphasenbeobachtungen gehen kleinräumige und kurzperiodische Effekte bei großen Stationsabständen allerdings verloren. Diese können nur über Regionalnetze und dann durch satellitenindividuelle Parametrisierung erfasst werden. Trotz einer möglichen Modellierung bzw. der Nutzung der ionosphärenfreien Linearkombination  $L_0$  verbleibt der zeitlich und räumlich variable Einfluss der Ionosphäre als eine hohe Anforderung, da für die genaue Koordinatenbestimmung vorab das Mehrdeutigkeitsproblem möglichst zuverlässig und schnell gelöst werden muss. So werden bei globalen Langzeitbeobachtungen meist nur  $L_0$ -float-Lösungen berechnet. Ein mögliches drittes GPS-Signal wird durch den größeren Frequenzabstand in (3.22) Vorteile erbringen.

### Troposphärische Refraktion

Mikrowellen erfahren eine nicht dispersive Laufzeitverzögerung und Strahlkrümmung in der unteren Atmosphäre (Troposphäre bis ca. 9 - 16 km und Stratosphäre bis ca. 50 km Höhe). Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten stimmen überein. Der Brechungsindex  $N_T$  ist nicht frequenzabhängig und funktionell nur an die meteorologischen Parameter Temperatur  $T$ , Druck  $p$  und den partiellen Wasserdampfdruck  $e_p$  gebunden. Eine empirische Formel für  $N_T$ , hier beispielsweise von *Smith und Weintraub (1953)*, wird meist in einen trockenen Anteil  $N_d$  und einen feuchten Anteil  $N_w$  aufgeteilt:

$$\begin{aligned} N_T &= \frac{77.6}{T} \cdot \left( p + \frac{4810}{T} \cdot e_p \right) \\ &= N_d(p, T) + N_w(e_p, T) = 77.6 \cdot \frac{p}{T} + 77.6 \cdot 4810 \cdot \frac{e_p}{T^2}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Die Laufzeitverzögerung  $d_{Trop}$  ergibt sich durch eine Integration entlang des Signalweges. Problematisch ist die Kenntnis der meteorologischen Parameter. Aus diesem Grund wurden bzw. werden empirische Modelle über deren Verteilung abgeleitet, in welche meteorologische Messdaten von der Erdoberfläche bzw. meist Werte aus einer Standardatmosphäre als Eingangswerte einfließen. Der Zeniteinfluss für mittlere Breiten beträgt für den trockenen Anteil ungefähr 2.3 m. Der Feuchteanteil liegt nur in der Größenordnung von 10 % davon bei etwa 0.2 m. Während die Bestimmung der hydrostatischen Komponente mit genauen Luftdruckmessungen an der Station mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern erfolgen kann, gelingt die Modellierung des feuchten Anteils auf Grund der hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität nur sehr schlecht mit einem Fehler im Bereich von 10-20 % (*Seeber 1993*). Oberflächenmessdaten für die meteorologischen Parameter sind dabei nicht repräsentativ für den gesamten Signalweg und werden in der normalen GPS-Auswertung kaum angewendet. Wie beim ionosphärischen Fehler verstärken sich die Unsicherheiten bei der Übertragung zu Signalen mit abnehmendem Elevationswinkel  $e$  durch den längeren Weg durch die Troposphäre erheblich. Bei der Umrechnung der Zenitverzögerung  $d_{Trop}^z$  mit *Mapping*-Funktionen  $m(e)$ , im einfachsten Fall über  $1/\sin(e)$ , werden dabei homogene Verhältnisse in den Schichten identischer Höhe vorausgesetzt:

$$\begin{aligned} d_{Trop}(e) &= m(e) \cdot d_{Trop}^z \text{ oder} \\ &= m_d(e) \cdot d_{Trop_d}^z + m_w(e) \cdot d_{Trop_w}^z. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Daraus lässt sich bereits folgern, dass die verschiedenen Modelle in hohen Elevationsbereichen besser zueinander passen als nahe dem Horizont. Hinweise, Literatur und Zusammenstellungen vieler Modelle und qualitative und quantitative Vergleiche finden sich u.a. in *Blomenhofer (1996)* und *Langley (1998a)*. Real variieren die troposphärischen Verhältnisse zeitlich und räumlich erheblich und sind zudem - wie aber normalerweise in den *Mapping*-Funktionen angenommen - auch nicht als azimuthal-symmetrisch anzusehen. Für kleinräumige Netze ohne starke Höhenvariationen und bei homogenen atmosphärischen Bedingungen werden differentielle Restfehler kaum den Millimeter-Bereich überschreiten. Für großräumige Netze, für große Höhenunterschiede zwischen Stationen und für inhomogene Refraktionsbedingungen ist dies nicht mehr gegeben. Aus diesem Grund werden Restfehler meist innerhalb der GPS-Auswertung durch zusätzliche Zenitparameter  $dZ^z$  pro Station in (3.24)

$$\begin{aligned}\hat{d}_{Trop}(e) &= m(e) \cdot (d_{Trop}^z + dZ^z) \\ &= m(e) \cdot d_{Trop}^z + m(e) \cdot dZ^z \\ &= d_{Trop}(e) + dZ(e)\end{aligned}\tag{3.25}$$

berücksichtigt. Sie können beispielsweise in Form eines Maßstabsfehler  $\delta$  durch

$$\hat{d}_{Trop}^z = d_{Trop}^z + dZ^z = (1 + \delta) \cdot d_{Trop}^z\tag{3.26}$$

mitmodelliert werden. Dabei können die Zenitparameter als zeitlich konstant oder als stochastischer Parameter im Gauss-Markov-Prozess geschätzt werden (*Brown und Hwang 1992*). In sehr kleinen Netzen sollten sie auf Grund der hohen Korrelationen untereinander gar nicht bzw. nur als differentielle Parameter  $\Delta dZ_{i,j}^z$  zwischen Stationen  $i, j$  mitgeschätzt werden, die dann beispielsweise noch mögliche Effekte durch starke Höhenunterschiede auf kurzer Entfernung berücksichtigen können. Die Modellierung von Zenitparametern kann zur Berücksichtigung von azimuthalen Variationen der troposphärischen Refraktion zusätzlich um horizontale Gradienten in Nord-Süd-Richtung  $dZ^n$  und Ost-West-Richtung  $dZ^e$  erweitert werden (*Davis u.a. 1993, MacMillan 1995, Bar-Sever u.a. 1998*), die dann Auswirkung auf die Lagekomponenten zeigen.

Es wird deutlich, dass die Modellierung der Troposphäre eng mit verbleibenden nicht erfassten Systematiken wie beispielsweise auch den PCV korreliert ist (Abschnitt 3.3). Zur Verbesserung der Erfassung der Refraktivität entlang des Signalweges wird auch die Verbindung zur Meteorologie und numerischen Wettermodellen hergestellt (*Schüler 2001*). Umgekehrt werden GPS-Beobachtungen, genauer die als integrierter Wasserdampf (*Precipitable Water Vapor PVW*) konvertierten Werte der Zenitverzögerung, für die Wettervorhersage genutzt (*Bevis u.a. 1992*). Dabei werden neuerdings die Ergebnisse der Daten von Referenzstationen mit Ergebnissen aus Radiookkultationsmessungen (Limb-Sondierungen) niedrig fliegender Satelliten (*Low Earth Orbiter LEO*) kombiniert (*Gendt u.a. 2002*). Diese Satellitenmissionen tragen neben den Messungen zur Refraktivität der neutralen Atmosphäre zusätzlich zur Ableitung von Ionosphärenmodellen bei (*Kleusberg 1998*).

## Vernetzte Referenzstationen - Aktuelle Entwicklungen PDGPS

Mittlerweile ist die Modellierung der entfernungsabhängigen Fehler so weit fortgeschritten, dass für Echtzeitanwendungen einzelner Rover-Stationen innerhalb von vernetzten regionalen Referenzstationsnetzen mit Stationsabständen von 30-50 km Genauigkeiten im Bereich von Millimetern bis zu(m) Zentimeter(n) erreicht werden. Dabei wird i.d.R. zwischen ionosphärischen und geometrischen Fehlern (Orbit, Troposphäre) getrennt, teilweise - je nach Modellierung - auch zwischen allen drei Einzelfehlern. So kann die Modellierung jeder Fehlerkomponente über ein funktionales und ein stochastisches Modell in einem Filter erfolgen, beispielsweise für die Ionosphäre in ein Polynommodell, einen zusätzlichen Parameter pro Satellit und die stochastische Modellierung der verbleibenden Restfehler (*Wübbena und Willgalis 2001*). Zukünftig ist, sofern Modelle verschiedener Auswerteprogramme homogenisiert werden, eine Übertragung dieser Zustandsinformationen für PDGPS in Echtzeit denkbar. Während Lösungen im Post-Processing eine simultane Auswertung und Modellierung über alle Stationen erlaubt, ist in Echtzeitanwendungen mit dem aktuellen RTCM-Standard z.Zt. nur die Berechnung und Übertragung von Korrekturdaten möglich. Dabei werden für hochgenaue Anwendungen Phasenkorrekturen (Beobachtungsraum) für die Rover-Station gerechnet und somit alle einzelnen Fehlerkomponenten wieder zusammengefasst. Dies geschieht über sog. Virtuelle Referenzstationen VRS (*Wanninger 2000*) oder über Flächenkorrekturparameter FKP (*Wübbena u.a. 2001a*).

### 3.2.2 Stationsabhängige Fehler

Die dominierenden entfernungsunabhängigen Fehler sind die Mehrwegeausbreitung und die Variationen des Antennenphasenzentrums. Die Antennenfehler werden ausführlich in den weiteren Kapiteln dieser Arbeit untersucht. Der Einfluss von Mehrwegeeffekten auf die Phasenmessung ist stark mit der Problematik der Phasenzentrumsvariationen der Antennen verbunden. Zusammen bilden sie die zwei Hauptfehlerquellen auf der Beobachtungsstation und sind die genauigkeitsbegrenzenden Faktoren für die hochpräzise Positionsbestimmung. Dies gilt speziell auch für kürzere Messzeiträume und unabhängig von der Netzausdehnung. Weiterhin wird die Konstruktion und das Empfangsverhalten von Antennen so abgestimmt, dass Mehrwegesignale möglichst gar nicht empfangen werden (Kapitel 4). Nicht zuletzt sind die Auswirkungen von Umwegsignalen sehr kritisch im Hinblick auf die Antennenkalibrierung zu betrachten. Mehrwegeeffekte sind bei Feldmessungen praktisch immer vorhanden und müssen für eine präzise und stationsunabhängige Antennenkalibrierung von den PCV getrennt werden (Kapitel 5). Selbst bei Kalibrierungen unter Laborbedingungen in sog. mikrowellentoten Kammern sind Signalreflexionen nicht vollkommen auszuschließen.

Der Fehler durch Multipath ist ein lokaler, individueller Effekt, der sich durch Differenzbildung der Beobachtungen zwischen Stationen nicht aufhebt. Der jeweilige Effekt ist eine Funktion von verschiedenen Faktoren (*Becker 1994*):

- wechselnde Geometrie zwischen Satellit, Reflektor und Empfangsantenne
- Signalstärke
- Reflektor (Material, Größe, Oberfläche)
- Hard- und Software (Antennen- und Empfängertechnologie).

Mehrwegeausbreitung entsteht durch Reflexion von elektromagnetischen Signalen an geeigneten Flächen, wobei auch Beugungserscheinungen (Diffraction) und Reflexionen des ausgesandten Signals am Satelliten zum Gesamtkomplex zu zählen sind. Ein oder mehrere reflektierte indirekte Signale längerer Laufzeit überlagern dabei das direkte Signal. Gleichzeitig treten Veränderungen der zirkularen Polarisation der GPS-Signale auf (vgl. auch Abschnitte 4.2.2, 4.4.1). In Abhängigkeit der Einflussparameter variieren die Signalamplituden und Code-Messungen und die Trägermischphase. Durch die sich stetig verändernde Geometrie auf Grund der Satellitenbewegung entstehen zyklische Effekte.

Es ist zwischen spiegelnder und diffuser Reflexion zu unterscheiden, wobei bei rauher werdender Reflektoroberfläche zunehmend diffuse Reflexionen auftreten. Die Wirkfläche für eine spiegelnde Reflexion kann über das Modell der Fresnelzonen und ein geringer Rauheitsgrad als Voraussetzung für eine spiegelnde Reflexion über das sog. Rayleigh Kriterium beurteilt werden (*Ray 2000*). Das Fresnelellipsoid ist ein Raum, in dem die Umwegsignale zwischen Sender und Empfänger mit einer konstanten Phasendifferenz von  $n \cdot \lambda/2$ , mit  $n = 1, 2, \dots$  im Vergleich zum direkten Signal empfangen werden. Die Verschneidung mit der Reflektorfläche repräsentiert die  $n$ -te Fresnelzone. Die große Halbachse  $a$  der Fresnelzone kann näherungsweise mit dem Radius  $R$  des zur Signalrichtung senkrechten Schnitts durch das Fresnelellipsoid, mit der Wellenlänge des Signals  $\lambda$ , mit der Entfernung  $l$  des Reflektors zum Sender  $S$  bzw. zum Empfänger  $E$  und mit dem Elevationswinkel  $e$  über

$$a \approx \frac{R_{Fresnel}}{\sin(e)} \quad \text{mit} \quad R_{Fresnel} = \sqrt{n \cdot \lambda \cdot \frac{l_S l_E}{l_S + l_E}} = \sqrt{n \cdot \lambda \cdot l_E} \quad (3.27)$$

berechnet werden kann. Für GPS mit  $l_S \gg l_E$  gilt die Vereinfachung auf der rechten Seite. Es wird deutlich, dass die Fresnelzone mit abnehmendem Elevationswinkel größer wird. Somit wird ein großer Reflektor benötigt, um für Signale niedrig stehender Satelliten die gleiche Energie (vollständig) zu reflektieren wie durch einen kleinen Reflektor für Signale hochstehender Satelliten. Auch hieraus ergibt sich die allgemeine Annahme einer höheren Wahrscheinlichkeit für Mehrwegefehler bei Satelliten mit kleinem Elevationswinkel, da neben einer geringeren Dämpfung mehr potentielle Reflektoren vorhanden sind, die allerdings eine größere Ausdehnung haben müssen. Neben der Reflektorgröße bestimmt die Rauigkeit die Möglichkeit für eine spiegelnde Reflexion mit Richtwirkung. Mit dem Rayleigh Kriterium wird eine genügend glatte Oberfläche über

$$\Delta h < k \cdot \frac{\lambda}{\sin(e)} \quad \text{mit} \quad k = \frac{1}{8} \dots \frac{1}{16} \dots \frac{1}{32} \quad (3.28)$$

als Abgrenzung zur diffusen Reflexion definiert. Dabei repräsentiert  $\Delta h$  die mittlere Höhe der Unebenheiten.

Für hochpräzise GPS-Anwendungen ist der Effekt auf die Trägerphase entscheidend. Der Multipath-Phasenfehler für einen einzelnen Reflektor, somit die Differenz zwischen Mischsignal und direktem Signal, ergibt sich mit der Wellenlänge  $\lambda$  zu (*Georgiadou und Kleusberg 1988*):

$$\Delta\varphi_{MP} = \arctan \frac{\alpha \cdot \sin(\theta)}{1 + \alpha \cdot \cos(\theta)}. \quad (3.29)$$

Dabei ist die differentielle Phasenverzögerung

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \quad \text{bzw.} \quad \frac{4\pi h}{\lambda} \cdot \sin(e) \quad (3.30)$$

eine Funktion der Reflektorgeometrie mit der Umweglänge  $d$ .  $\theta$  lässt sich auch aus dem senkrechten Abstand des Empfangspunktes zur Reflektorfläche  $h$ , beim horizontalen Reflektor die Antennenhöhe, und der Elevation  $e$  berechnen. Der Reflexionskoeffizient  $\alpha$  als Verhältnis der Amplituden des direkten und des indirekten Signals variiert zwischen 0 und 1. Die maximalen Fehler sind nur abhängig vom Reflexionskoeffizient. Bei einer theoretischen unendlich kleinen Dämpfung, charakterisiert durch einen Reflexionskoeffizient von 1, kann ein maximaler Phasenfehler durch Multipath 4.7 cm für  $L_1$  und 6.1 cm für  $L_2$  betragen. Die Frequenz des Mehrwegesignals (3.29) ergibt sich zu:

$$f_{\Delta\varphi_{MP}} = \frac{2h}{\lambda} \cdot \cos(e) \cdot \frac{de}{dt}. \quad (3.31)$$

Die Frequenz ist umgekehrt proportional zur Wellenlänge, aber proportional zum Reflektorabstand, zum Cosinus der Elevation und zur Änderungsrate der Elevation. Während der Phasenfehler durch Multipath funktional durch die Reflektorgeometrie, die Wellenlänge und den Reflexionskoeffizienten beschrieben wird, ist die Amplitude  $A$  des Summensignals von der Wellenlänge unabhängig (*Bishop u.a. 1985*), es gilt  $A_{L_1} = A_{L_2}$ . Neben Code- und Phasenfehlern durch Mehrwegeausbreitung treten ähnliche Effekte als periodische Amplitudenschwankungen auf, die sich im Signal-Rausch-Verhältnis S/N (*signal-to-noise-ratio*) bzw. C/N (*carrier-to-noise-ratio*) manifestieren (Kapitel 4). Diese Signalstärke zeigt das Mittel der Signalüberlagerung zwischen direktem und reflektiertem Trägersignal. Da diese sich in Abhängigkeit von der Variation der differentiellen Phasenverzögerung  $\theta$  konstruktiv und destruktiv überlagern können, variiert auch die Signalstärke entsprechend. Code und Datensignal tragen dabei nicht zur Signalstärke bei, die mit oder ohne Code-Modulation und Datenstrom gleich bleibt.

Eine Gesamtbetrachtung der Mehrwegeausbreitung zeigt folgende Effekte (*Ray 2000*). Code-Fehler und Amplitudeneffekte verhalten sich phasengleich zueinander, wohingegen der Trägerphasenfehler phasenverschoben zu beiden in Quadratur steht. Ein maximaler Code-Fehler (dm-m) tritt zusammen mit maximaler Signalamplitude auf. Dies tritt bei  $\theta = 0$  an der Stelle auf, an der der Phasenfehler  $\Delta\varphi_{MP}$  seinen Nulldurchgang hat und minimal ist. Ein maximaler Phasenfehler (mm-cm) hingegen tritt dann auf, wenn die Signalamplitude wie auch der Codefehler ein Minimum aufweisen. Nach (3.29) können zudem Sprünge im Phasenfehler auftreten. Bei kurzen Abständen zwischen Antenne und Reflektor ergeben sich langwellige Effekte mit Perioden bis zu Stunden. Das Mehrwegesignal ändert sich nur langsam, aber weist ein starkes Signal auf. Bei größeren Abständen zwischen Antenne und Reflektor hingegen, im Bereich mehrerer Meter und erheblich mehr, treten hochfrequente Effekte mit Perioden u.a. im Minutenbereich bei gleichzeitig schwachem Signal auf. Im Gesamtbild nicht zu vergessen sind vereinzelt auftretende Diffraktionseffekte, wobei Fehler bis zu maximal einem Dezimeter auftreten können (*Wanninger u.a. 2000*).



Verfahren zur Minimierung des Einflusses durch Mehrwegeausbreitung setzen auf eine geeignete Auswahl von Messungsort und Antenne, auf Algorithmen im Empfänger und auf Modelle zur Signalverarbeitung der gewonnenen Beobachtungen. Durch eine vorsichtige Standortwahl können spezielle Reflektorverhältnisse grundsätzlich vermieden werden, wobei allerdings vielfach logistischen Erfordernissen Prioritäten eingeräumt werden müssen. Zudem können sich vorhandene Verhältnisse möglicherweise verändern. Beispielsweise können Veränderungen durch Schnee und Feuchtigkeit erwartet werden (Böder 2002), was durch die starke Variabilität des Reflexionskoeffizienten verschiedener Oberflächen (Liu 1991) plausibel ist. Die Nutzung verschiedener Antennenkonstruktionen beinhaltet spezielle Grundplatten, Choke Rings, Design von Axialverhältnis und *gain* und Mehrelementantennen (Kapitel 4). Eine Reduzierung erfolgt dabei hauptsächlich für bodenreflektierte und weniger für oberhalb der Grundplatte reflektierte Signale.

Die Entwicklung von Algorithmen zur Minimierung der Mehrwegeeffekte innerhalb der Hard- und Software des Empfängers bezieht sich vor allem auf Code-Multipath und betrifft Entwicklungen des Korrelators bzw. mehrerer paralleler Korrelatoren im Zusammenhang mit der Chip-Länge der Codes. Dazu zählen beispielsweise der *Narrow-Korrelator* (Van Dierendonck u.a. 1992), das Modell der *Multipath Estimation Delay Lock Loop MEDLL* (Van Nee 1995), der *Strobe-Korrelator* (Garin und Rousseau 1997) u.a. Allen Verfahren gemeinsam ist, dass besonders hochfrequenter Code-Multipath durch entferntere Reflektoren minimiert wird und kaum Vorteile bezüglich der Trägerphasen vorliegen. Werden in Kalibrierungsmodellen Code- und Trägerphasenbeobachtungen kombiniert, so besteht die Problematik, dass nicht mehr die originären, sondern nur noch Code-Beobachtungen nach erfolgter interner Signalverarbeitung vorliegen.

Auf die vorliegenden Beobachtungsdaten für Code, Phase und Amplitude bzw. S/N setzen Modelle zur Bearbeitung der Mehrwegefehler auf. Dies ist bereits für den Codefehler möglich, zum Beispiel seine Minimierung durch Phasenglättung (Hatch 1982) oder seine Berechnung durch eine Kombination mit den Trägerphasenbeobachtungen zur Beseitigung des ionosphärischen Fehlers bei gleichzeitiger Vernachlässigung des Mehrwegefehlers der Phase (Langley 1998b). Eine Codephasenglättung wird teilweise auch direkt im Empfänger vorgenommen.

Wichtiger für die hochpräzise Positionsbestimmung ist der Effekt der Trägerphase. Die einfachste Vorgehensweise zur Fehlerreduzierung ist dabei die Langzeitmessung. Entwicklungen und Untersuchungen der Empfängertechnik zeigen, dass ein zeitliches Mittel von durch Mehrwegefehlern behafteten Codebeobachtungen, vor allem bei großem Reflexionskoeffizienten, nicht Null ist, was ebenso für die Signalstärke gilt (Sleewaegen 1997). Für die Trägerphase hingegen tendiert ein Mittel gegen Null (Van Nee 1995, Braasch 1996, Eisfeller 1997), sodass sich der Mehrwegeeffluss über einen längeren Zeitraum herausmitteln kann. Für Kurzzeitbeobachtungen ist somit andererseits nur eine Kalibrierung möglich.

Grundsätzlich kann gezeigt werden (Böder u.a. 2001), dass bei einer Veränderung der Mehrwegeeffekte, beispielsweise durch Geometrieänderungen, auch Änderungen im Signal-Rausch-Verhältnis auftreten. Obwohl darin auch diverse andere Einflussparameter wie Signalstärke, Sende- bzw. Empfangsverhalten der Antennen, Atmosphäre, Kabel, Hard- und Software des Empfängers u.a. enthalten sind, kann ein normiertes Signal somit in Verfahren der Mehrwegekalibrierung von Vorteil sein (Wübbena und Schmitz 2002). Einige Modellierungsansätze nutzen das Signal-Rausch-Verhältnis direkt. Zum Beispiel zeigen Comp und Axelrad (1996) und Sleewaegen (1997), dass die Signalamplitude tatsächlich zur Berechnung von Mehrwegeeffekten der Trägerphasenmessung beiträgt. Dabei werden a priori Annahmen beispielsweise über das Antennenempfangsverhalten (*gain*, vgl. Kapitel 4) getroffen, um die C/N-Beobachtungen in einer normierten Weise nutzen zu können. Andere Verfahren verwenden das Signal-Rausch-Verhältnis auch zur Gewichtung von Beobachtungen, um den Effekt durch Mehrwegeausbreitung nicht zu

kalibrieren, sondern zu minimieren (*Brunner u.a. 1999, Wanninger u.a. 2000*). Dabei werden Exponentialansätze oder auch elevationsabhängige, hardwarespezifische sog. *Templates* zur Gewichtung und Elimination eingesetzt. Das oben beschriebene komplexe Verhalten zwischen Phase und Amplitude des Mehrwegefehlers weist für diese Verfahren allerdings auf mögliche Probleme vor allem in Kurzzeitanwendungen hin.

Weitere Kalibrierungsansätze nutzen direkt die Trägerphasenbeobachtungen aus Messungen mehrerer GPS-Stationen. Eine Reduzierung des Mehrwegeeffektes erreichen *Wanninger und May (2000)* in einem Regionalnetz nach einer Identifikation betroffener Bereiche und anschließender Bestimmung aus einer Residuenbetrachtung. Voraussetzung sind Annahmen über Signale ohne Mehrwegebeeinflussung und das Ausblenden niedriger und hoher Elevationsbereiche. Die Kalibrierung wird nur für Linearkombinationen durchgeführt, da das Messrauschen in einem Regionalnetz im Vergleich zu den geringen Mehrwegefehlern der Originalsignale sehr groß ist. Ionosphärische Restfehler können wesentlich stärker ausfallen. Dies ist allgemein auch der Nachteil von anderen In-Situ-Verfahren, die teilweise Residuen der ionosphärenfreien Linearkombination aus mehrjährigen Messreihen globaler Netze analysieren.

Andere Kalibrierungsansätze für die Originalsignale nutzen die Korrelation der Mehrwegefehler auf sehr kurzer Entfernung. Durch die Verwendung eines Antennenfeldes (*Antenna Array*) und spezieller Signalverarbeitung kann eine Reduzierung durch eine digitale Ausrichtung auf die direkten Signale und auch eine Kalibrierung von Mehrwegefehlern erfolgen (*Brown 2001*). Ebenso mit einem Multi-Antennenfeld kalibriert *Ray (2000)* die Trägerphasenfehler für  $L_1$  und  $L_2$ . Dabei werden die geometrischen Beziehungen zwischen den Einzelantennen zur Berechnung der Mehrwegefehler genutzt. Dabei müssen Annahmen über das Empfangsverhalten (Phase, Amplitude) der Antennen getroffen werden. Die geometrischen Beziehungen gelten nur für kohärente, spiegelnde Einfachreflexionen.

Es ist auch eine genaue Kalibrierung der Mehrwegefehler der Originalsignale für einen Standpunkt mit bereits vorhandener Antenne möglich. Dabei muss auf kurzer Basis, somit ohne störende atmosphärische Effekte, eine Station quasi frei von Einflüssen sein, um für die zweite Station die Residuen in-situ betrachten zu können. Im sog. *Antenna and Multipath Calibration System AMCS* wird eine auf die Satelliten schwenkbare Parabolantenne mit hoher Richtwirkung als Referenz genutzt, um verbleibende Fehler einer fest montierten zweiten Antenne zu modellieren (*Park u.a. 2002*). Voraussetzung sind u.a. eine gemeinsame Uhr der beiden Empfänger und die genaue Kenntnis des Empfangsverhaltens und der Bewegungen der Referenzantennenkonstruktion.

Das Hannoversche Verfahren (*Böder u.a. 2001, Böder 2002*) ist eine Weiterentwicklung der in dieser Arbeit beschriebenen Absoluten Feldkalibrierung von GPS-Antennen. Zur Verfügung stehen damit hochauflösende und stationsunabhängige PCV. Die Referenz bildet eine Antenne auf einem kalibrierten Roboterarm, welcher schnelle Bewegungen ausführt. Die PCV werden korrigiert und die Roboterbewegung präzise zentriert, sodass die Beobachtungsdaten prinzipiell wieder denen einer statischen Antenne entsprechen. Durch die Bewegung können die Mehrwegeeffekte von Epoche zu Epoche dekorreliert werden. Auf diese Weise tritt kein systematischer Mehrwegeeinfluss auf die Trägerphase auf. Es bleibt fast nur hochfrequentes Rauschen mit der erhöhten Amplitude des mit einem Mehrwegefehler behafteten Signals übrig. Auf einer kurzen Basis wirken keine Fehler durch Atmosphäre und Bahn. Die Uhrfehler und Mehrdeutigkeiten werden bestimmt und die PCV auch für die zweite statische Station korrigiert. Somit treten theoretisch nur noch die Mehrwegefehler der beiden Stationen auf, die innerhalb eines Filters als stochastische Prozesse beschrieben werden können. Durch die Dekorrelation auf der kinematischen Station verbleibt nur der Anteil der zu kalibrierenden Station, welcher durch ein geeignetes Modell beschrieben werden

kann. Diese Korrekturen beinhalten dann alle Fehler, die sich durch den Antennenstandpunkt zusätzlich zu den ortsunabhängigen, antennenspezifischen PCV ergeben, also Mehrwegefehler, Diffraktionsfehler und auch mögliche Veränderungen der PCV durch Stationseinflüsse im Nahfeld. Durch dieses Verfahren und möglichen Verfeinerungen hinsichtlich der Modellierung werden Stationskalibrierungen auf Millimeter-Niveau für die Originalsignale über die gesamte Hemisphäre bis zum Horizont möglich sein. Dies ist für präzise Anwendungen mit Kurzzeitbeobachtungen nicht nur wegen Auswirkungen im Positionsraum, sondern auch wegen erheblichen Effekten auf die Mehrdeutigkeitslösung (*Joosten u.a. 2002*) erforderlich.

### 3.3 Anmerkungen zur präzisen GPS-Höhenbestimmung

Die Probleme einer hochpräzisen Positionsbestimmung betreffen besonders die Höhenkomponente. Neben der Verschlechterung der Höhenkomponente aus rein geometrischen Gründen (Satellitenkonstellation) tragen speziell auch die physikalischen Eigenschaften der Signalausbreitung, deren Modellierungen und die dadurch auftretenden starken Korrelationen zwischen verschiedenen Parametern zu einem Genauigkeitsverlust bei. Für eine Verbesserung sind u.a. genaue PCV-Korrekturen erforderlich.

Die Problematik wird häufig bildlich als das aufzulösende „Bermuda-Dreieck“ (*Beutler 1998*) bzw. „Bermuda-Viereck“ (*Rothacher 1999*) bezeichnet und beschreibt die starken Korrelationen zwischen Troposphäre, Stationskoordinaten (Höhen) und dem Phasenzentrum der Empfangs- und auch Sendeantenne (Abschnitt 8.3). Erstmals wurden systematische Untersuchungen zu diesem Bereich von *Santerre (1989, 1991)* durchgeführt. Generell ergibt sich in Abhängigkeit von der Satellitenkonstellation (Stationsbreite) als Konsequenz einer hohen Korrelation zwischen Uhrparameter, Stationshöhe und Zenitverzögerungsparameter die im Vergleich zur Lage schlechter bestimmbare Höhenkomponente. Speziell die zusätzliche Schätzung eines Troposphärenparameters verschlechtert im Vergleich zu einer Auswertung ohne diesen Parameter die Höhe erheblich. Mit zunehmendem Zenitwinkel bzw. kleiner werdenden Elevationsmaske erfolgt eine Dekorrelation und folglich Verbesserung der Höhenkomponente.

Bei der Betrachtung einer einfachen Troposphärischen *Mapping*-Funktion (Feuchteanteil)  $1/\sin(e)$  wird klar, dass auch die PCV der Antennen (Empfänger und Satellit) mit ihrem stark elevationsabhängigen Verhalten zu dieser Gruppe der korrelierten Parameter zählen. Durch eine extrem schlechte und unsymmetrische Satellitenkonstellation können weiterhin noch Korrelationen der genannten Parameter zu den Lagekomponenten auftreten. Dies ist sicherlich im Zusammenhang mit der Schätzung von richtungsabhängigen Gradienten im Troposphärenmodell, mit azimutalen PCV und auch mit der Mehrwegeausbreitung als zusätzlich problematisch anzusehen. Eine Erweiterung des „Bermuda-Vierecks“ um Fehler durch Mehrwegeausbreitung ist denkbar, da speziell in den zur Dekorrelation der Parameter benötigten niedrigen Elevationsbereichen i.d.R. mehr Effekte auftreten können.

Es ist zu beachten, dass die von *Santerre (1989, 1991)* dargelegten Verschlechterungen der Höhenkomponente bereits prinzipiell für korrekte Modellierungen der Parameter gelten. Werden systematische Fehler vernachlässigt bzw. sind diese nicht bekannt, dann können sich sehr viel stärkere Auswirkungen auf die Höhenkomponente ergeben. So nimmt ein Troposphärenparameter jegliche Restfehler der Range-Messung auf. Auch hier führt die Betrachtung der einfachen *Mapping*-Funktion  $1/\sin(e)$  zu der Erkenntnis, dass Verstärkungen dieser Restfehler auftreten. Ein Fehler von 1 cm im Zenit-Delay bewirkt dann bei  $10^\circ$  Elevation bereits einen Range-Fehler von über 5 cm und noch mehr für Beobachtungen nahe am Horizont. Zudem weisen die Troposphärenmodelle die größten Unsicherheiten für niedrige Elevationen auf. Andere Untersuchungen

zeigen, dass bei den Fehlerwirkungen zwischen absoluten und relativen troposphärischen Effekten unterschieden werden kann (*Beutler u.a. 1988*). Absolute, für beide Endpunkte einer Basislinie  $b$  gültige Troposphärenfehler bewirken über

$$\frac{db}{b} = \frac{\Delta d_{Trop(a)}^z}{R \cdot \cos(z_{max})}. \quad (3.32)$$

einen Maßstabsfehler in Abhängigkeit des absoluten Fehlers in Zenitrichtung  $\Delta d_{Trop(a)}^z$  und des maximal auftretenden Zenitwinkels  $z_{max}$ . Ein absoluter Troposphärenfehler von 2 cm ergibt demnach einen relativen Koordinatenfehler in der Größenordnung von 0.01 ppm. Ein relativer troposphärischer Fehler  $\Delta d_{Trop(r)}^z$  zwischen den Endpunkten bewirkt in erster Näherung hingegen einen Höhenfehler

$$\Delta h = \frac{\Delta d_{Trop(r)}^z}{\cos(z_{max})}. \quad (3.33)$$

Jede vernachlässigte Änderung von 1 mm differentiellem Troposphärenfehler ergibt bereits einen relativen Höhenfehler von 3-5 mm bei maximalen Zenitwinkeln  $z_{max}$  zwischen 70-80°. Die Betrachtungen der Effekte verdeutlicht die Wichtigkeit einer korrekten Erfassung aller Parameter. Die Impräzision, also die fehlende Kenntnis von Restsystematiken in den Beobachtungen, ist das zu lösende Problem auf dem Weg zur Millimeter-Genauigkeit mit GPS. Speziell die stationsabhängigen Fehler müssen dabei bestimmt werden.

# Kapitel 4

## Beschreibung von GPS-Antennen

Der Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Darstellung des Einflusses der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen auf die hochgenaue Positionsbestimmung. Die Grundlagen und Eigenschaften der genutzten Antenne aus elektrotechnischer Sicht sind dem Geodäten dabei meist weniger bekannt. Aber gerade in diesem Bereich ist Hintergrundwissen erforderlich, da sich durch die Forderung eines „guten“ und stabilen Empfangsverhalten (Abschnitt 4.5) für Anwendungen der hochpräzisen Positionsbestimmung Zwangspunkte für Konstruktion und Design der Antenne ergeben. Zudem gehören zur Beschreibung der Antenne neben den Phasenzentrumsvariationen weitere vor allem die Signalqualität beeinflussende Eigenschaften (Abschnitt 4.2.2). Die PCV als konkrete geometrische Größen im GPS-Fehlerhaushalt spielen dabei eine zentrale Rolle. Sie bewirken eine direkte Veränderung der Streckenmessung.

Die Grundlagen über elektromagnetische Wellen, Aufgaben und Eigenschaften von Antennen und Antennentypen geben in diesem Kapitel einen Überblick als Basis für die später folgenden Detailuntersuchungen. Dieser Abriss kann natürlich nicht dem Anspruch einer kompletten Darstellung genügen, da es sich um eine komplexe elektrotechnische Thematik handelt. Für weitergehende detaillierte Darstellungen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht erforderlich sind, sei auf umfassende Standardwerke der Grundlagen von Antennen wie *Kraus (1988)*, *Rothammel (1995)*, *Balanis (1997)*, *Johnson (1993)* und *Carr (1998)* verwiesen. Bei der Beschreibung der Antenneneigenschaften und von Antennentypen werden auch die englischen Bezeichnungen aufgenommen, da diese vielfach in der deutschsprachigen Literatur verwendet werden. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung der PCV und den Anforderungen an Antennen und an deren Kalibrierung für die hochpräzise GPS-Vermessung.

### 4.1 Wellentheorie elektromagnetischer Felder

Elektromagnetische Wellen (*EM-Wellen*) sind periodische Zustandsänderungen (Störungen) eines elektromagnetischen Feldes, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Grundsätzlich wird eine Welle - und somit auch die elektromagnetische Welle - durch ihre Frequenz  $f$  bzw. Wellenlänge  $\lambda$  beschrieben. Allgemein ergibt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  einer Welle als deren Produkt zu

$$v = \lambda \cdot f \tag{4.1}$$

mit  $v$  in Metern pro Sekunde [m/s],  $\lambda$  in Metern [m] und  $f$  in Schwingungen pro Sekunde bzw. Hertz [Hz]. Die Wiederholung eines Zustandes der Welle nach einer bestimmten Zeit und an einem bestimmten Ort ist ihre Periodizität. Das Zeitintervall des wiederholten Auftretens eines Zustandes bzw. der Störung ist die Periode  $P$ . Die Entfernung dazwischen ist die Wellenlänge  $\lambda$ . Die Periode  $P$  ist reziprok zur Frequenz  $f$ . Mit ihrer Hilfe, der Kreisfrequenz

$$\omega = 2\pi f \quad (4.2)$$

und der so genannten Phasenkonstante oder Wellenzahl

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.3)$$

folgt als Erweiterung von (4.1):

$$v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{P} = \frac{\omega}{k}. \quad (4.4)$$

Für elektromagnetische Wellen gilt eine Abhängigkeit der Wellenlänge und somit der Ausbreitungsgeschwindigkeit vom zu durchlaufenden Medium. Für den freien Raum, das Vakuum, ist  $v$  identisch mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  (4.20). Aus (4.1) folgt

$$c = \lambda_{\text{Vakuum}} \cdot f. \quad (4.5)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Nichtvakuum hängt vom Brechungs- oder Refraktionsindex

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{\text{Vakuum}}}{\lambda} \quad (4.6)$$

bzw. der normierten Brech- oder Refraktionszahl

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (4.7)$$

ab (*Seeber 1993*). Weitere Details hinsichtlich der Signalausbreitung von Elektromagnetischen Wellen sollen an dieser Stelle nicht behandelt werden. Allgemeines zum Aufbau und zur Ausbreitung in der Atmosphäre findet sich u.a. in *Rothammel (1995)* und *Carr (1998)*. Für speziell die GPS-Frequenzen betreffende Problematiken wie Refraktion, Diffraktion und Reflexion sei auf Lehrbücher wie *Seeber (1993)* verwiesen.

Die theoretischen Grundlagen der elektromagnetischen Felder und Wellen wurden durch James Clerk Maxwell gelegt. 1873 publizierte Maxwell eine Theorie zur Vereinigung der Elektrizität und

des Magnetismus, die 1886 durch Heinrich Hertz (*Hertzscher Dipol, Hertzsche Wellen*) praktisch nachgewiesen wurde (*Kraus 1988*). Maxwell postulierte die vollständige Symmetrie zwischen Elektrizität und Magnetismus (*Vogel 1997*): **Ein sich zeitlich änderndes elektrisches Feld erzeugt ein magnetische Wirbelfeld. Ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld.** Die Grundlage für die Existenz, die Ausbreitung und das Verhalten elektromagnetischer Wellen bilden die Maxwellschen Gleichungen. Diese vier Differentialgleichungen zeigen die Wechselwirkung zwischen elektrischen und magnetischen Feldern:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (4.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.10)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (4.11)$$

Dabei ist  $\mathbf{E}$  der Vektor der elektrischen Feldstärke,  $\mathbf{B}$  der Vektor der magnetischen Induktion,  $\mathbf{J}$  der Vektor der elektrischen Stromdichte,  $\rho$  die Ladungsdichte,  $\epsilon_0$  die elektrische Feldkonstante und  $\mu_0$  die magnetische Feldkonstante. Formel (4.8) besagt, dass Ladungen elektrische Felder erzeugen, deren Feldlinien in den Ladungen beginnen und enden. Alle Ladungen sind Quellen von  $\mathbf{E}$ . Formel (4.9) zeigt, dass bewegte Ladungen Magnetfelder mit geschlossenen Feldlinien um die Ströme erzeugen. Das Magnetfeld  $\mathbf{B}$  ist quellenfrei. Dass ein sich zeitlich veränderndes Magnetfeld  $\mathbf{B}$  ein elektrisches Wirbelfeld  $\mathbf{E}$  erzeugt, wird durch Formel (4.10) dargestellt. Die geschlossenen Feldlinien von  $\mathbf{E}$  umkreisen dabei die Änderungsrichtung von  $\mathbf{B}$ . Die letzte Formel (4.11) konnte Maxwell nach der Einführung des so genannten Verschiebungsstromes aufstellen. Alle Ströme und Verschiebungsströme, also zeitliche Veränderungen von  $\mathbf{E}$ , erzeugen Wirbel von  $\mathbf{B}$ . Für die Annahme eines freien Raumes ohne Ladungen ( $\rho = 0$ ) und Ströme ( $\mathbf{J} = 0$ ) vereinfachen sich die Gleichungen zu:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \operatorname{div} \mathbf{E} = 0 \quad (4.12)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = \operatorname{div} \mathbf{H} = 0 \quad (4.13)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (4.14)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \operatorname{rot} \mathbf{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (4.15)$$

Dabei ist  $\mathbf{H}$  die magnetische Feldstärke. Die Feldkomponenten  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  können für homogene Schwingungen der Frequenz  $\omega$  und mit Hilfe der Eulerschen Formel  $e^{i\omega} = \cos \omega + i \sin \omega$  in komplexe Schreibweise umgeformt werden. Die Formeln (4.14) und (4.15) ergeben sich dann zu:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \operatorname{rot} \mathbf{E} = -i\omega \mu_0 \mathbf{H} \quad (4.16)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \operatorname{rot} \mathbf{H} = i\omega \epsilon_0 \mathbf{E}. \quad (4.17)$$

Als Lösungen der obigen Gleichungen ergeben sich zwei Differentialgleichungen (*Langley 1998a*), die Wellengleichungen

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\epsilon_0 \mu_0 \omega^2 \mathbf{E} \quad (4.18)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = -\epsilon_0 \mu_0 \omega^2 \mathbf{H}. \quad (4.19)$$

Es kann gezeigt werden, dass die Maxwell'schen Differentialgleichungen ebene Wellen als Lösungen haben und man das elektromagnetische Feld zeitlich und räumlich beschreiben kann. Es ergeben sich transversale - d.h. mit einer Oszillation senkrecht zur Ausbreitungsrichtung - elektromagnetische Wellen, die sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (4.20)$$

ausbreiten (*Vogel 1997*). Die Ausbreitungsrichtung ist senkrecht zu den Feldstärkevektoren. Dabei beschreibt ihr Vektorprodukt, der *Poynting Vektor*

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}, \quad (4.21)$$

die Energiestromdichte in diese Richtung. Der  $\mathbf{E}$ -Vektor (oder äquivalent der  $\mathbf{H}$ -Vektor) einer ebene Welle, die sich in z-Richtung ausbreitet (Abbildung 4.1), lässt sich als

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\omega \left(t - \frac{z}{c}\right)} \quad (4.22)$$

oder als Sinusfunktion

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \sin \omega \left(t - \frac{z}{c}\right). \quad (4.23)$$

darstellen. Richtung und Amplitude werden dabei durch  $\mathbf{E}_0$  gegeben. Der Begriff der ebenen Welle dient zur anschaulicheren und vereinfachten Beschreibung von elektromagnetischen Wellen. Eine tatsächlich grundsätzlich ebene Wellenfront existiert nicht. Ausgehend von einer punktförmigen Strahlungsquelle breiten sich elektromagnetische Wellen gleichmäßig in alle Richtungen aus. Die Wellenfronten gleicher Phase lassen sich als Kugelschalen beschreiben. In weiter Entfernung ist deren Krümmung nur noch sehr gering. Ein Ausschnitt dieser Fläche kann dort als eben angesehen werden.

Mit (4.4) folgt aus (4.22)

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - k z)}. \quad (4.24)$$



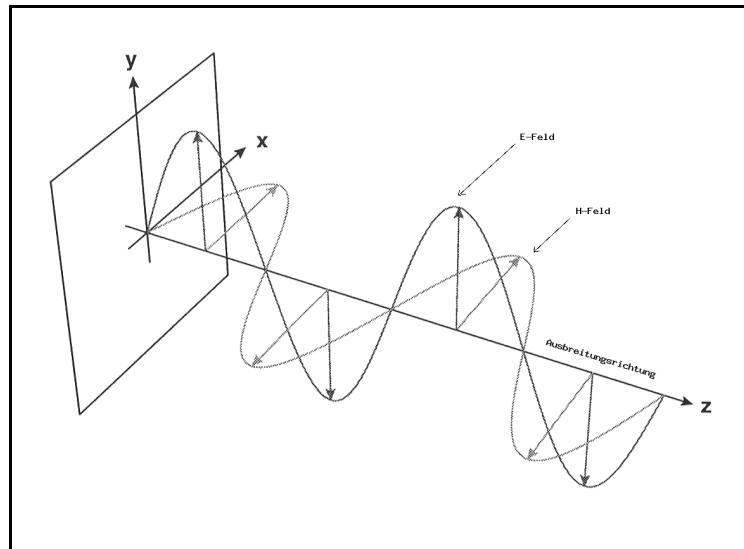


Abbildung 4.1: Momentaufnahme der Ausbreitung eines elektromagnetischen Feldes (nach *Langley 1999*). Das elektromagnetische Feld ist transversal. Das elektrische und das magnetische Feld stehen senkrecht aufeinander und beide senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Eine Verallgemeinerung von (4.24) mit dem in Ausbreitungsrichtung zeigenden Wellenvektor  $\mathbf{k}$  ergibt für das an einem bestimmten Ort durch den Vektor  $\mathbf{r}$  definierte Feld

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}. \quad (4.25)$$

Der Momentanwert der elektrischen Feldstärke an einem bestimmten Beobachtungsort zur Zeit  $t$  kann dann allgemein durch

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - \phi)} \quad (4.26)$$

beschrieben werden. Der gesamte Ausdruck  $(\omega t - \phi)$  ist dabei die Phase bzw. der Phasenwinkel von  $\mathbf{E}$  und  $\phi$  eine Konstante. Die Phase  $\phi$  einer periodischen Welle bezeichnet den Bruchteil der Gesamtperiode  $P$  zu einem Zeitpunkt  $t$  bezüglich eines Ausgangszeitpunktes. Aus (4.26) gelangt man zu einer üblichen Darstellung als Sinuswelle (z.B. *Seeber 1993*)

$$y = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{P} + \Phi_0 \right) = A \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (4.27)$$

Hier beschreibt  $y$  die Größe der Störung zum Zeitpunkt  $t$ ,  $\Phi_0$  die Phase und  $\varphi_0 = 2\pi\Phi_0$  der Phasenwinkel zum Ausgangszeitpunkt  $t = 0$  und  $A$  der maximal auftretende Wert bzw. die Amplitude der Welle. Phase und Amplitude sind neben der Frequenz und der Wellenlänge weitere definierende Kennzeichen einer Welle. Eine Erweiterung von (4.27) um die Entfernung  $s$  zwischen Ausgangspunkt und Beobachtungsort ist (nach *Mansfeld 1998*)

$$y = A \sin\left(\omega t - \omega \frac{s}{c} + \varphi_0\right) = A \sin\left(\omega t - k s + \varphi_0\right). \quad (4.28)$$

Eine Welle kann zeitlich oder örtlich beschrieben werden. Erfolgt eine Beobachtung nicht an einem bestimmten Ort zur Zeit  $t$  (4.28), sondern zu einer konstanten Zeit an verschiedenen Orten, so ergibt sich mit dem Phasenwinkel zum Zeitpunkt der Messung ( $\varphi_k + \varphi_0$ )

$$y = A \sin\left(\varphi_k + \varphi_0 - \omega \frac{s}{c}\right) = A \sin\left(\varphi_k + \varphi_0 - k s\right). \quad (4.29)$$

Eine weitere individuelle Definition einer elektromagnetischen Welle - neben den bereits eingeführten Kennzeichen Frequenz, Wellenlänge, Amplitude und Phase - erfolgt über ihre Polarisation. Dazu wird die Richtung bzw. die Schwingungsebene der elektrischen Feldkomponente beschrieben.  $\mathbf{E}_0$  aus (4.22) bis (4.26) kann grundsätzlich zwei Komponenten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung enthalten,  $\mathbf{E}_{0x}$  parallel zur x- und  $\mathbf{E}_{0y}$  parallel zur y-Achse. Der Allgemeinfall ist die elliptische Polarisation. Dabei besitzt der elektrische Feldvektor beide Komponenten mit unterschiedlicher Phase. An einem bestimmten Ort rotiert  $\mathbf{E}$  als Funktion der Zeit, und seine Spitze beschreibt die Polarisationsellipse. Das Verhältnis zwischen großer und kleiner Halbachse heißt Axialverhältnis  $AR$  (*axial ratio*). Hieraus ergeben sich als Sonderfälle die lineare und die zirkuläre Polarisation. Bei der linearen Polarisation schwingt der Feldvektor in einer Ebene. Die beiden Komponenten sind in gleicher Phase. Ist eine Komponente 0 und somit  $AR = \infty$ , spricht man von vertikaler Polarisation mit elektrischen Feldlinien senkrecht oder von horizontaler Polarisation mit elektrischen Feldlinien parallel zur Ausbreitungsrichtung. Bei der zirkulären Polarisation (Abbildung 4.2) ist die Amplitude der x- und der y-Komponente jeweils gleich groß und  $AR = 1$ . Der Phasenunterschied ist  $\pm 90^\circ$ . Abhängig vom Umlaufsinn der Spitze des Feldvektors, wird dabei noch zwischen linksdrehender Polarisation, links zirkular LHCP (*left-handed circular polarisation*), und rechtsdrehender Polarisation, rechts zirkular RHCP (*right-handed circular polarisation*), unterschieden. Der Polarisationszustand kann auch über die so genannte Poincaré Kugel (*Poincaré Sphere*) dargestellt werden (*Kraus 1988*). Dabei wird der jeweilige Zustand durch einen bestimmten Punkt auf einer Kugel repräsentiert. Den Kugelkoordinaten Länge und Breite werden jeweils Parameter der Polarisationsellipse zugeordnet.

Die Polarisation ist hinsichtlich des Empfangsverhalten einer Antenne von großer Bedeutung, da bei unterschiedlichen Polarisationszuständen von EM-Feld und Empfangsantenne Verluste auftreten (vgl. Abschnitt 4.2.2). Das bedeutet gleichzeitig, dass Sende- und Empfangsantenne eine identische Polarisation besitzen sollten (kopolar). Man spricht von einer Polarisationsentkopplung (*Suckrow u. a. 1995*), wenn Sende- und Empfangsantenne entgegengesetzte Polarisation aufweisen (kreuzpolar). Eine linear horizontal ausgerichtete Antenne kann theoretisch keine linear vertikal ausgesendete Welle empfangen. Gleiches gilt für links- und rechtsdrehend zirkular polarisierte Antennen. Praktisch tritt eine absolute Entkopplung, d.h. eine theoretische unendliche Dämpfung, auf Grund von Beugungs- und Reflexionseffekten nicht auf. Im Kurzwellenbereich ändert sich bei der Ausbreitung in der Ionosphäre der Polarisationszustand, was zu Schwunderscheinungen (*Polarisationsfading*) führt (*Rothammel 1995*). Dadurch hat die Polarisation in diesem Frequenzbereich weniger Bedeutung als zum Beispiel im Meterwellen-Bereich. Auch hier findet keine vollständige Signalauslöschung statt, sondern lediglich eine starke Dämpfung.

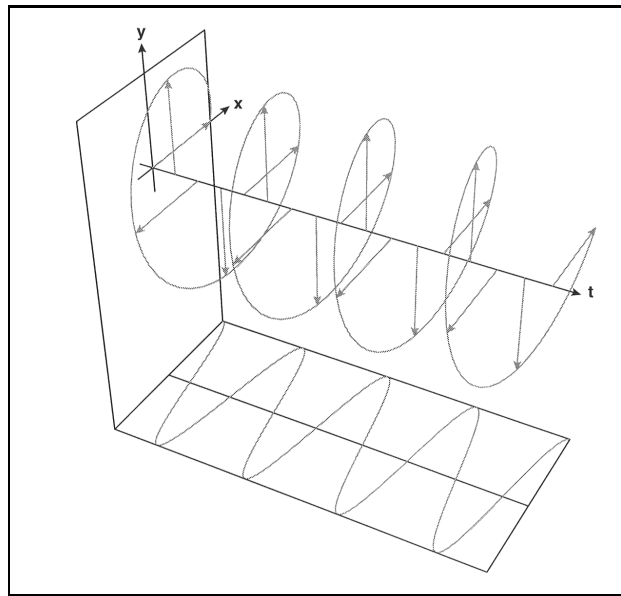


Abbildung 4.2: Darstellung der zeitlichen Variation des elektrischen Feldvektors einer rechtshändig zirkular polarisierten Welle (z.B. GPS) an einem bestimmten Ort (*Langley 1999*).

## 4.2 Aufgaben und Charakteristika von Antennen

### 4.2.1 Definition und Aufgabe einer Antenne

Nach der Aufstellung der Theorie der elektromagnetischen Wellen durch Maxwell und ihrem ersten praktischen Nachweis durch Hertz dauerte es fast eine Dekade, bis diese Grundlagen in Entwicklungen für praktische Anwendungen zum Tragen kamen. Guglielmo Marconi befasste sich als erster mit der Nutzung der elektromagnetischen Wellen zur Datenübertragung (*Kraus 1988*) und führte 1901 eine erste Signalübertragung über eine große - hier transatlantische - Distanz durch.

In einer grundlegenden Definition des Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas* (IEEE Std 145-1983), wird die Antenne einfach als Einrichtung zum Ausstrahlen und Empfangen von Radiowellen beschrieben (*Balanis 1997*). Genauer gesagt ist die Antenne somit eine Übergangsstruktur bzw. der Übergangsbereich zwischen leitungsgebundener Welle und Freiraumwelle in der drahtlosen Übertragungstechnik (Wellentypwandler). Sie ermöglicht diesen Übergang in beiden Richtungen. Dieses so genannte Reziprozitätstheorem besagt, dass die gleiche Antenne mit gleichbleibenden Eigenschaften und Kenngrößen zum Empfangen und Senden verwendet werden kann. Ausnahme sind aktive Antennen, in der Praxis vorwiegend Empfangsantennen, die integrierte Verstärkerschaltungen enthalten.

Der Übergangsbereich kann als eine langsam aufspreizende Leitung beschrieben werden (Abbildung 4.3). Sie ist ein „Anpassungstransformator“ (*Stirner 1980*) zwischen dem Wellenwiderstand der Leitung und dem Wellenwiderstand des freien Raumes (4.30). Eine Empfangsantenne entnimmt dem elektromagnetischen Feld einer sich im freien Raum ausbreitenden Welle Energie und führt diese in einer Leitungswelle weiter. Im Sendefall wird die von einem Hochfrequenzgenerator erzeugte Energie in Form elektromagnetischer Wellen ausgestrahlt. Prinzipiell ergeben sich drei mögliche Antennenformen (Bsp. Empfangsantenne). Entweder wird durch das magnetische

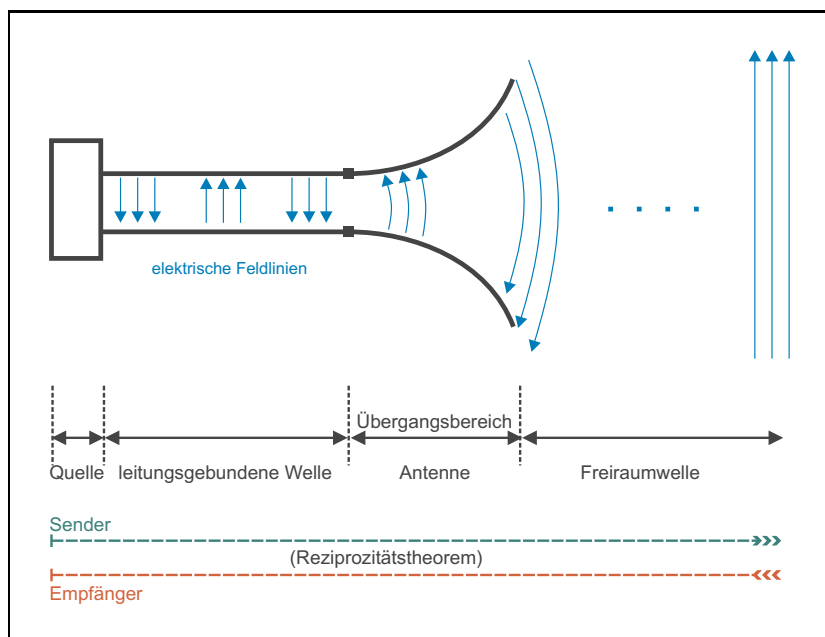


Abbildung 4.3: Abstrahlung der EM-Welle. Antenne als Übergangsstruktur zwischen leitungsgebundener Welle und Freiraumwelle. Der Übergang kann in beiden Richtungen erfolgen (Reziprozitätstheorem).

Wechselfeld ein Strom induziert (Schleifenantennen), oder das ankommende elektrische Feld regt einen Strom an (Stabantennen), oder aber es wird ein Teil des äußeren Feldes in einem Hohlleiter weitergeführt (Hohlleiterantenne). Bei der Abstrahlung, der Ablösung einer Welle von elektrischen Ladungen, muß das elektromagnetische Wechselfeld spezielle Bedingungen vorfinden. Eine Antenne strahlt (empfängt) Energie möglichst effektiv ab. Ein Signal soll definiert abgegeben werden. Im Gegensatz dazu stehen die Leitungen (*transmission lines, waveguides*). Hier soll Abstrahlung und somit Leitungsverlust möglichst vermieden werden. Für die genaue Beschreibung der Ablösung einer elektromagnetischen Welle von einer Leitungsstruktur, zum Beispiel an einem Dipol als sehr häufig gegebenes anschauliches Beispiel, sei für Details wie Feldgleichungen und Strom- und Spannungsverteilung auf weiterführende Literatur wie *Balanis (1997)* und *Rothammel (1995)* verwiesen. Das Prinzip ist trotz der vielfältigen Antennentypen immer das Gleiche. Ein Generator regt Strom an und kehrt immer wieder seine Polarität um. Ladungen werden aufgebaut und es entstehen Potentialdifferenzen. Der Moment der größten Ladungsmenge entspricht der größten Potentialdifferenz und somit dem Maximum des elektrischen Feldes. Das Magnetfeld ist dann abgebaut. Durch Polarisationsumkehr strömen die Ladungen wieder. Hat der Strom sein Maximum erreicht, so weist das Magnetfeld auch sein Maximum auf. Der wechselweise Auf- und Abbau des elektrischen und des magnetischen Feldes wird durch die Generatorfrequenz gesteuert. Die Maxima von Strom und Spannung weisen eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  auf. Durch die Polarisatsumkehr entstehen immer wieder Felder mit einem umgekehrten Richtungssinn, die sich dann vom Leiter ablösen und mit Lichtgeschwindigkeit im Raum ausbreiten. Für eine vollständige Abstrahlung muss das Verhältnis zwischen der Sende- bzw. Empfangsfrequenz und der Länge des Antennenelementes abgestimmt sein, um Resonanz auszubilden. Die Antenne kann auch als Schwingkreis bezeichnet werden. Es handelt sich dabei um ein gedämpftes System, da durch die Abstrahlung des EM-Feldes Energie abgegeben wird. Diese muss ständig wieder zugeführt werden, damit die Schwingung fortgesetzt werden kann.

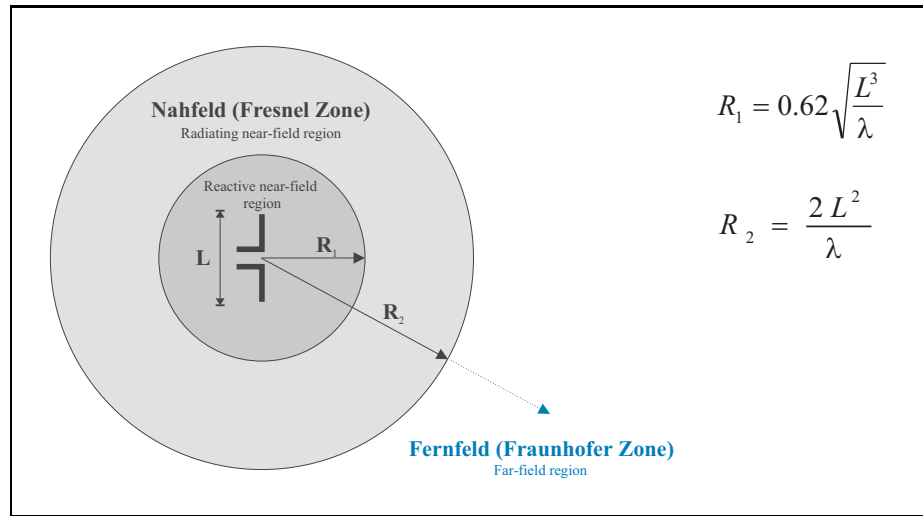


Abbildung 4.4: Definition von Nah- und Fernfeld einer Antenne. Bei einer maximalen Antennen- ausdehnung  $L$  und einer Wellenlänge  $\lambda$  wird die Grenze zwischen beiden Regionen beim Abstand  $R = \frac{2L^2}{\lambda}$  gesetzt.

Die  $90^\circ$ -Phasenverschiebung der Maxima von Magnetfeld und elektrischem Feld bei der Abstrahlung gilt nur in der unmittelbaren Umgebung der Antenne, dem Nahfeld. Eine Leistung als Produkt von Spannung und Strom kann hier nicht ausgenutzt werden (Blindleistung). Das elektrische Feld weist eine radiale und eine dazu senkrechte Komponente auf. Daraus resultiert die Krümmung des Feldes. In Abständen groß zur Wellenlänge, dem Fernfeld, verschwindet diese radiale Komponente. Es bildet sich eine homogene und lineare Wellenfront. Hier in der so genannten Wellenzone speisen sich elektrisches und Magnetfeld durch gegenseitige Induktion. Die elektrischen und magnetischen Feldkomponenten sind senkrecht zueinander und wieder gleichphasig. Die Leistung kann genutzt werden (Wirkleistung). Elektrische und magnetische Komponenten stehen hier durch den Feldwellenwiderstand des freien Raums (*intrinsic impedance of free space*)

$$Z_0 = \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega \quad (4.30)$$

in einem festen Verhältnis.

Die Beschreibung von Nah- und Fernfeld (Abbildung 4.4) wird an dieser Stelle noch etwas präzisiert, da es sich dabei um eine grundlegende Beschreibung einer Antenne und ihrer Feldstruktur handelt. Das Nahfeld wird nach *Balanis (1997)* noch in eine reaktive *reactive near-field region* und eine strahlende Zone *radiating near-field (Fresnel) region* mit einer Grenze bei  $0.62 \sqrt{L^3/\lambda}$  unterteilt, um den Übergang zwischen Blind- und Wirkleistung zu beschreiben.  $L$  bezeichnet den Durchmesser der Antennenwirkfläche. Der Übergang von der Fresnel-Zone zum Fernfeld (Fraunhofer-Zone) liegt in [m] bei:

$$R = \frac{2L^2}{\lambda}. \quad (4.31)$$

Das reaktive Nahfeld bezeichnet die unmittelbare Umgebung der Antenne. In der Fresnelzone, dem Übergang zum Fernfeld, herrscht bereits eine Energieabstrahlung vor. Sind die Abmessungen der Antenne sehr klein gegenüber der Wellenlänge, so existiert diese Region u.U. gar nicht. Allgemein gilt für das Nahfeld ( $\mathbf{k} \mathbf{r} \ll 1$ ), dass die Form des Feldes entfernungsabhängig ist. Im Fernfeld ( $\mathbf{k} \mathbf{r} \gg 1$ ) sind die  $\mathbf{E}$ - und  $\mathbf{H}$ -Feldkomponenten wieder senkrecht zueinander - die radiale Komponente des elektrischen Feldes existiert nicht mehr - und sind transversal zur Ausbreitungsrichtung. Die Energie wird radial nach außen abgestrahlt (Poynting Vektor).

Es gibt Antennen in diversen Formen und unterschiedlichsten charakteristischen Kenngrößen (Abschnitt 4.2.3). Je nach Nutzungsart und Anwendungsgebiet weisen sie - auch innerhalb einer Antennenform - verschiedene Konstruktionsmerkmale und Eigenschaften auf.

### 4.2.2 Eigenschaften von Antennen

Die unterschiedlichen Charakteristika von Antennen werden über bestimmte Parameter und Eigenschaften beschrieben. Zu diesen gehören die folgenden Kategorien:

- Gewinn
- Richtcharakteristik bzw. Richtdiagramm
- Polarisation
- weitere Kenngrößen wie Impedanz, Antennenrauschen, Bandbreite etc.

Zur Beschreibung elektrischer Eigenschaften werden oft Kenngrößen wie zum Beispiel Leistungsangaben  $P_i$  ins Verhältnis gesetzt, wobei u.U. sehr große Werte entstehen können. Zur ihrer Vermeidung werden logarithmische Maße benutzt, üblicherweise der Logarithmus zur Basis 10. Kennzeichen ist die Einheit Bel bzw. Dezibel [dB]. Für das Beispiel einer linearen Verstärkung von  $v_{lin} = 2$  ergibt sich das logarithmische Maß  $v_{log}$  zu

$$\begin{aligned} v_{log} &= \log 10^{v_{log}} = \log 2 = \log 10^{0.3} = 0.3 \\ &= 0.3 \cdot 10 \text{ dB} = 3 \text{ dB}. \end{aligned} \tag{4.32}$$

Logarithmische Leistungsverhältnisse berechnen sich zu (*Suckrow u.a. 1995*)

$$v = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \text{ dB}. \tag{4.33}$$

Das Vorzeichen ist positiv bei größerer Ausgangsleistung und negativ bei Dämpfung und Verlusten. Für ein Verhältnis von Spannungen  $U$  (analog für Strom  $I$ ) ergibt sich aus  $P = U^2/R$  für gleiche Widerstände  $R$  wie beispielsweise der üblichen gemeinsamen Systemimpedanz von  $Z_0 = 50 \Omega$

$$v = 10 \log \frac{U_2^2}{U_1^2} \text{ dB} = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \text{ dB}. \quad (4.34)$$

Die beschriebenen Größen sind relative Pegel. Es werden Leistungs-, Spannungs- oder Stromverhältnisse gebildet. Durch die logarithmische Darstellung können auch absolute Größen dargestellt werden. Dabei wird ein Verhältnis bezüglich eines bekannten Referenzwertes gebildet. Leistungsangaben können zum Beispiel auf 1 mW bezogen werden. Der logarithmische Wert einer Leistung  $P = 100 \text{ mW}$  ist

$$10 \log \frac{100 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} = 20 \text{ dBm}. \quad (4.35)$$

Der **Gewinn** (*gain*) einer Antenne wird durch ein entsprechendes Verhältnis beschrieben. Alle folgenden Betrachtungen gelten gemäß dem Reziprozitätsprinzip (*reciprocity theorem*) gleichermaßen für den Fall des Empfangs wie auch der Abstrahlung einer Antenne. Antennen strahlen Energie bevorzugt in bestimmte Raumrichtungen ab. Die Kenngröße Gewinn erlaubt eine Aussage über die aufgenommene Leistung in Hauptstrahlrichtung gegenüber einer Referenzantenne. Dabei handelt es sich nicht um eine Verstärkung, denn meist sind Antennen passive Gebilde. Ein Verstärker erzeugt einen Leistungszuwachs. Eine Antenne hingegen kann eine bestimmte Leistung nur räumlich verteilen. Eine in alle Richtungen gleichmäßig verteilte Leistung entspricht einem isotropen Kugelstrahler. Dieser hypothetische und nicht realisierbare, verlustlose und punktförmige Strahler, meist unter der Annahme einer linearen Polarisation, dient in der Regel als Bezugsantenne. Der Gewinn wird in diesem Fall in dBi angegeben. Er wird auch als absoluter oder isotroper Gewinn  $G_i$  bezeichnet. Es ist weiterhin ein relativer Gewinn definiert, wobei der Bezug eine andere bekannte Antenne ist (*Balanis 1997*). Weitere Erklärungen und Definitionen zu Bezugsantennen finden sich in *Rothammel (1995)*. Der Gewinn  $G_i$  wird als das Verhältnis der von einer Antenne in Hauptstrahlrichtung im Fernfeld erzeugten maximalen Leistungsdichte  $S_{r,max} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$  (vgl. Poynting-Vektor) zur Leistungsdichte der Bezugsantenne  $S_i$  (Kugelstrahler in gleicher Entfernung):

$$G_i = \frac{S_{max}}{S_i}. \quad (4.36)$$

Beiden Antennen wird dabei die gleiche Leistung zugeführt. Es gilt zudem, gleichermaßen für einen Punktstrahler wie auch für jede Antenne im Fernfeld, dass der Poynting-Vektor  $\mathbf{S}$  nur eine radiale Komponente  $S_r$  aufweist. Somit gilt  $|\mathbf{S}| = S_r$ . Im Empfangsfall ist der Gewinn das Verhältnis der verfügbaren Empfangsleistung  $P_E [\text{W}]$  zur Empfangsleistung  $P_i$  des Kugelstrahlers:

$$G_i = \frac{P_E}{P_i}. \quad (4.37)$$

Empfangsfall bedeutet, dass Test- und Bezugsantenne am gleichen Ort im Fernfeld einer mit konstanter Leistung gespeisten Sendeantenne sind (*Stirner 1980*). Zudem ist die Testantenne bezüglich Richtcharakteristik und Polarisation optimiert. Als Leistungsmaß in dB ergibt sich analog zu (4.33) und (4.34)

$$G_i = 10 \log \frac{P_E}{P_i} \text{ dB} \quad \text{oder} \quad 20 \log \frac{U_E}{U_i} \text{ dB.} \quad (4.38)$$

Der Gewinn ist mit dem Richtfaktor (*directivity*)  $D$  und dem Antennenwirkungsgrad (*antenna radiation efficiency*)  $\eta$  verbunden durch

$$G = \eta \cdot D \quad \text{mit} \quad 0 \leq \eta \leq 1. \quad (4.39)$$

Der Richtfaktor ist der Gewinn einer verlustfreien Antenne ( $\eta = 1$ ). Er beschreibt das Verhältnis der maximalen Empfangsleistung im ebenen Wellenfeld zur mittleren Empfangsleistung bei Annahme von gleich gutem Empfang von Strahlung aus allen Richtungen, also zur Empfangsleistung eines Kugelstrahlers.  $D$  wird immer in dBi angegeben. Der Antennenwirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen abgestrahlter und gesamter zugeführter Leistung. Treten keine Verluste auf, ist  $\eta = 1$  und somit  $G = D$ . Die Kenngröße Gewinn ist weiterhin mit der Ausdehnung der Antenne verbunden. Dabei wird zwischen der tatsächlichen räumlichen Ausdehnung, der geometrischen Apertur (*physical aperture*)  $A_{geom}$ , und der Antennenwirkfläche, der effektiven Apertur (*effective aperture*)  $A_W$ , unterschieden. Ihr Verhältnis

$$\eta_A = \frac{A_W}{A_{geom}} \quad (4.40)$$

wird als Flächenausnutzung bzw. Flächenwirkungsgrad (*aperture efficiency*) bezeichnet. Die Antennenwirkfläche  $A_W$  ist wie der Gewinn ein Maß für die Leistung  $P_E$ , die einem ebenen Wellenfeld mit der Energiestromdichte  $S$  entnommen werden kann:

$$P_E = S \cdot A_W. \quad (4.41)$$

Eine Verknüpfung wie bei Gewinn und Richtfaktor besteht über den Antennenwirkungsgrad  $\eta$ . Zudem besteht eine direkte Proportionalität zum Gewinn. Es gilt

$$A_W = \eta \cdot A_{geom} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G = \frac{P_E}{S}. \quad (4.42)$$

Im Gegensatz zur integralen Aussage des Gewinns, kann das Abstrahl- bzw. Empfangsverhalten auch als Funktion der Richtung (Kugelkoordinaten  $\theta$ ,  $\phi$ ) beschrieben werden. Dies ist die so genannte **Richtcharakteristik** (*radiation/antenna pattern*). Die Richtcharakteristik beschreibt somit die Richtungsabhängigkeit der von einer Antenne erzeugten Feldstärke nach Amplitude, Phase und Polarisation in einem konstanten Abstand unter Fernfeldbedingungen (*Rothammel 1995*). Das Richtdiagramm (Abbildung 4.5) entspricht einem flächenhaften Schnitt durch die Richtcharakteristik. Hier wird zwischen Horizontal- bzw. Vertikaldiagramm zum Beispiel mit Bezug zur Erdoberfläche unterschieden. Um die Ausrichtung der Antenne mit einzubeziehen, gelingt eine eindeutigere Beschreibung mit einem E- und H-Diagramm (Schnitte in Richtung der elektrischen



oder magnetischen Feldlinien). Die Darstellungen erfolgen üblicherweise als Polardiagramm oder als kartesisches Diagramm. Dabei wird der Winkel  $0^\circ$  der Hauptstrahlrichtung zugeordnet. Der Messwert an dieser Stelle wird 1 bzw. 100 % oder auch 0 dB gesetzt. Alle folgenden Messwerte werden zu diesem Maximalwert ins Verhältnis gesetzt.

In der Praxis wird die Richtcharakteristik am häufigsten anhand des Fernfeldes und der Amplitude der elektrischen oder magnetischen Feldstärke einer bestimmten Polarisation beschrieben. Die auf einen Maximalwert normierte relative Richtcharakteristik ist

$$C(\theta, \phi) = \frac{|\mathbf{E}(\theta, \phi)|}{|\mathbf{E}_{max}|} = \frac{|\mathbf{H}(\theta, \phi)|}{|\mathbf{H}_{max}|}, \quad r = const. \quad (4.43)$$

Durch die Normierung ist keine Abhängigkeit mehr von  $r$  (Kugelkoordinaten Radius) vorhanden. Es entsteht eine dimensionslose Größe mit einem Betrag zwischen 0 und 1. Weiterhin wird für die Ermittlung der Richtcharakteristik auch die von der Antenne einem ebenen Wellenfeld bestimmter Polarisation aufgenommene Empfangsspannung genutzt. Wird anstelle der elektrischen oder magnetischen Feldstärken die Leistungsdichte in (4.43) verwendet, so kann auch ein Leistungsdiagramm berechnet werden (*Kraus 1988*). Dieses stellt einen direkten Bezug zur Gewinnberechnung her.

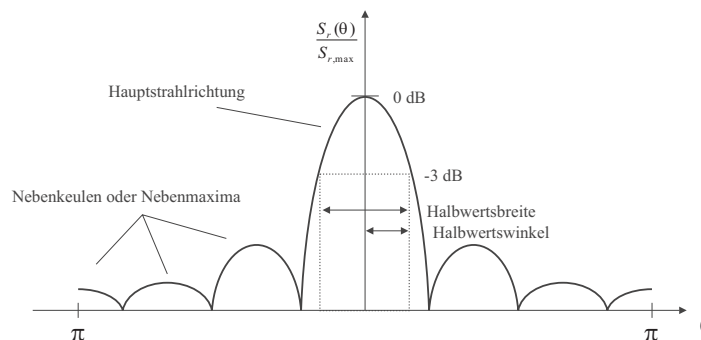


Abbildung 4.5: Beispiel für Diagramm einer Richtantenne (Vertikales Leistungsdiagramm, kartesisch). Kugelkoordinatensystem mit Hauptstrahlrichtung bei  $\theta = 0$ . Die Richtantenne weist eine Hauptstrahlungs- und weitere Nebenkeulen, auch im rückwärtigen Bereich, auf.

Aus den Richtdiagrammen werden weitere Antennenkenngrößen deutlich. Dazu gehören die horizontale oder vertikale 3-dB- bzw. Halbwertsbreite (*half-power beamwidth HPBW*). Dies ist der Winkelbereich, an dessen Grenzen die Strahlungsdichte gegenüber dem Maximum - räumlich gesehen der Strahlungskeule (*beam area, beam solid angle*) - in Hauptstrahlrichtung auf den halben Wert (-3 dB) abgefallen ist. Der horizontale oder vertikale Halbwertswinkel ist der Winkel zwischen der Richtung des Strahlungsmaximums und der Richtung mit im Vergleich dazu halb so großer Strahlungsleistung. Ein weiteres Kennzeichen einer Antenne ist das Vor-/Rückverhältnis bzw. in logarithmischer Form die Rückdämpfung. Es beschreibt das Verhältnis der Feldstärke in Hauptstrahlrichtung zur rückwärtig auftretenden Feldstärke. Einer Antenne wird für ein besseres Abstrahl- bzw. Empfangsverhalten durch einen bestimmten mechanischen Aufbau eine Richtwirkung gegeben. Richtantennen haben eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Vorzugsrichtung. Ein Dipol mit Rundstrahlcharakteristik erhält durch eine Reflektorwand eine Richtwirkung. Dabei ist der rückwärtige Raum nicht vollständig abgeschirmt, da der Reflektor nicht unendlich

groß sein kann. Durch Beugungs- und Streueffekte an den Kanten gelangt ein Teil der Leistung in den der Hauptstrahlrichtung entgegengesetzten Bereich. Jede Antenne hat eine individuelle Charakteristik des Richtdiagramms. Lässt sich das Abstrahlverhalten von einfachen Antennentypen wie einem Dipol sehr genau voraussagen bzw. berechnen, so wird diese Aufgabe mit einem zunehmend komplizierten mechanischen Aufbau schwieriger. Neben einer Hauptstrahlungskeule (*major/main lobe*) entstehen weitere Nebenkeulen (*minor/side lobes*). Bei Richtantennen sind Nebenkeulen unerwünscht, da Energie der Hauptstrahlrichtung verloren geht. Zudem können hier Mehrwegesignale aufgenommen werden. Vergleichbar mit dem Vor-/Rückverhältnis lässt sich der Nebenkeulenabstand bzw. die so genannte Nebenzipfeldämpfung definieren. Dabei wird das Verhältnis der Feldstärke in Hauptstrahlrichtung zur Feldstärke einer Nebenkeule gebildet.

Die **Polarisation** (*polarisation*) wurde bereits detailliert als Kennzeichen der EM-Welle in Abschnitt 4.1 eingeführt. Bei der Freiraumübertragung müssen zur Vermeidung einer Polarisationsentkopplung zwischen Sende- und Empfangsantenne demnach beide gleiche Polarisation aufweisen. Bei Abweichungen treten Dämpfungen, also Leistungsverluste auf. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die theoretische Dämpfung auf Grund unterschiedlicher Polarisationszustände. Praktisch treten durch Beugung oder Reflexionen an Metallkörpern und leitenden Stäben oder Flächen immer Ablenkungen des elektrischen Feldvektors auf. Das verhindert einerseits eine vollständige Entkopplung. Andererseits können Reflexionen zum Beispiel bei zirkularer Polarisation eine Umkehr der Drehrichtung bewirken. Dabei werden die E-Feldkomponenten unterschiedlich beeinflusst. Die parallel zur Fläche einfallende Komponente wird mit einem  $180^\circ$  Phasensprung und die senkrecht zur Fläche einfallende mit gleicher Phase reflektiert.

Tabelle 4.1: Dämpfung bei unterschiedlicher Polarisation Sende- und Empfangsantenne.

	vertikal ↑	horizontal →	rechts zirkular ↻	links zirkular ↺
vertikal ↑	0 dB	$\infty$	3 dB	3 dB
horizontal →	$\infty$	0 dB	3 dB	3 dB
rechts zirkular ↻	3 dB	3 dB	0 dB	$\infty$
links zirkular ↺	3 dB	3 dB	$\infty$	0 dB

Eine Vielzahl weiterer Kenngrößen beschreibt den individuellen elektronischen Aufbau von Antennen und ihr Sende- bzw. Empfangsverhalten. Dazu gehören die Impedanz (*impedance*) und der Strahlungswiderstand der Antenne. Die Strom- und Spannungsverteilung auf einer Antenne zeigt gleichzeitig die Widerstandsverhältnisse. Man unterscheidet Wirkwiderstände (reelle Widerstände) und Blindwiderstände (induktive oder kapazitive Widerstände) (*Suckrow u. a. 1995*). Die frequenzabhängige Gesamtimpedanz, setzt sich aus beiden Anteilen zusammen und wird deshalb auch als komplexer Widerstand bezeichnet. Die Impedanz kann für jeden Punkt der Antenne berechnet werden. Allgemein bezeichnet sie aber den Speise- oder Fußpunktwiderstand (auch Eingangswiderstand). Diese Größe spielt eine entscheidende Rolle für optimale Leistungsübernahme vom Sender bzw. optimale Leistungsabgabe an einen Empfänger. Die Antennenkenngröße Strahlungswiderstand stellt den Ersatzwiderstand dar, den äquivalenten ohmschen Widerstand, der die abgestrahlte Leistung verbrauchen würde. Die Kenngröße Bandbreite (*bandwidth*) gibt

das Frequenzband an, innerhalb dessen die Antenne hinsichtlich ihrer Bestimmung gut arbeitet. Wie beschrieben ändern sich Strom- und Spannungsverhältnisse mit der Frequenz und somit auch die Eingangsimpedanz und die Strahlungseigenschaften. Der Frequenzbereich mit möglichst kleinen Änderungen ist die Nutzbandbreite der Antenne. Schließlich gehören zu den umfangreichen Kenngrößen einer Antenne auch noch das Antennenrauschen bzw. die Rauschtemperatur (*antenna noise/temperature*). Antennen rauschen, weil an ihrem Wirkwiderstand eine so genannte Rauschspannung auftritt (*Rothammel 1995*). Dieses Rauschen bezeichnet man als (thermisches) Eigenrauschen. Hinzu addiert sich die Rauscheinstrahlung aus Umgebung, Atmosphäre und Weltall (galaktisches Rauschen). Für Details wird auf *Kraus (1988)* verwiesen. In *Langley (1997a)* wird speziell der Bezug zu GPS hergestellt.

Die Kenngrößen von Antennen werden auch praktisch gemessen. Dazu gehören Messungen der Impedanz, der Stromverteilung und der Rauschtemperatur (z.B. *Stirner 1985*). Die Richtcharakteristik - Amplituden- und Phasenverlauf (*amplitude and phase pattern*) und Polarisation - und der Gewinn werden auf Messstrecken mit bekannten Referenzantennen bestimmt. Dabei wird v.a. unter Fernfeldbedingungen gemessen, da die Beschreibungen der EM-Felder und ihrer Eigenschaften für ebene Wellen im Fernfeld gelten. Die Richtcharakteristik ist hier nur eine Funktion der Raumwinkel und nicht abhängig von der Entfernung zur Antenne. Es dürfen keine Phasenfehler durch Laufzeitdifferenzen zwischen Sendeantenne zur Mitte und zu den Rändern der Wirkfläche der zu testenden Antenne auftreten. Je nach Antenne und den erforderlichen Abständen zum Einhalten der Fernfeldbedingungen werden Freifeldmessungen oder Messungen in speziellen Hallen durchgeführt. Neben einem stabilen mechanischen Messaufbau ist besonders wichtig, Fremdeinstrahlungen und Reflexionen zu vermeiden. Aus diesem Grund werden für Messungen abgeschirmte und durch spezielle Absorber möglichst reflexionsfreie Messplätze eingerichtet, so genannte Absorberhallen (*anechoic chamber*). Freifeld- oder Kammermessungen unter Fernfeldbedingungen können nicht immer realisiert werden. Es ist auch möglich, im Nahfeld zu messen und anschließend die Ergebnisse durch komplexe analytische Methoden in das Fernfeld zu transformieren. Die Antennenmesstechnik ist eine umfangreiche Thematik (z.B. *Balanis 1997*), die hier nicht weiter vertieft werden soll. Weitere Einzelheiten in Bezug zur Kammerkalibrierung von GPS-Antennen werden in Abschnitt 5.3 gegeben.

### 4.2.3 Antennentypen

Es gibt eine Vielzahl verschiedenster Antennentypen. Grundsätzlich hängen die Auswahl des einzusetzenden Typs und dessen konstruktiven Gesichtspunkte (Strahlungseigenschaften, Gewicht, Größe und Volumen, mechanische Stabilität etc.) von den jeweiligen speziellen Anwendungen ab. Durch ihre Form und Lage werden die Randbedingungen bezüglich der ankommenden ebenen Welle (Fernfeld) gegeben. Die verschiedenen Antennentypen können allgemein in mehrere Gruppen eingeteilt werden:

- Drahtantenne (*wire antennas*)
- Hohlleiterantennen (*aperture antennas*)
- Reflektor- oder Spiegelantennen (*reflector antennas*)
- Linsenantennen (*lens antennas*)
- Microstrip- oder Patch-Antennen (*microstrip or patch antennas*)
- Mehrelementantennen (*array antennas*)

Eine **Drahtantenne** (*wire antenna*) kann aus einem oder mehreren Strahlerelementen oder ganzen Drahtstrukturen bestehen. Zu dieser Gruppe gehören Stab- oder Linearantennen, Rahmen- oder Schleifenantennen. Schleifenantennen (*loop antennas*) können eine runde, elliptische, rechteckige, quadratische oder andere Form haben. Auch die so genannten Wendel- oder Spiralantennen, auch als Helix (*helical antenna, helix*) bezeichnet, gehören zu dieser Kategorie. Zu der am häufigsten vorkommenden Form zählt die Monopol- bzw. Dipolantenne (*dipole*), die als gestreckter Dipol, als Faltdipol oder als Kreuzdipol bzw. Drehkreuz (*turnstile*) auftritt. Diese Gruppe von Antennen wird häufig im Mittel- und Kurzwellenbereich eingesetzt, u.a. als TV- oder Radioantennen für den terrestrischen Empfang. Der Halbwellendipol als einfachste Antennenform ist dabei das Grundelement. Zu den bei GPS-Anwendungen eingesetzten Antennen aus dieser Kategorie gehören Kreuzdipole und Helixantennen, mit denen zirkular polarisierte Wellen empfangen (abgestrahlt) werden können. Beim Kreuzdipol werden zwei Halbwellendipole senkrecht zueinander angeordnet und jeweils mit Strömen gleicher Amplitude, aber mit einer  $90^\circ$ -Phasenverschiebung gespeist. Dadurch entstehen die bereits in Abschnitt 4.1 beschriebenen zirkular polarisierten Wellen (*Stirner 1980*). Helix-, Wendel-, Spiralantennen bestimmter Bauweise können auch zirkular polarisierte Wellen empfangen (abstrahlen). Ihr Richtdiagramm weist dabei kleine Nebenzipfel und eine hohe Polarisationsreinheit auf. Helixantennen werden auch für Satellitenanwendungen, u.a. auf den GPS-Satelliten, verwendet. Es sind drei verschiedene Strahlungszustände möglich. Bei einem gegenüber der Wellenlänge sehr kleinem Wendelumfang entsteht der seltener verwendete Querstrahler (*normal-mode*). Die häufigste Betriebsart als Längsstrahler (*axial-mode*) in Richtung der Wendelachse tritt auf, wenn der Wendelumfang ungefähr der Wellenlänge entspricht. Eine Mischform bei Abstrahlung der Leistung schräg zur Wendelachse (*conical-mode*) entsteht bei Durchmessern der Wendel, die größer als die Wellenlänge sind. Die Abstrahlcharakteristik, die Polarisationsreinheit und die Bandbreite können u.a. über den Steigungswinkel und über die Länge der Wendel gesteuert werden. Die unsymmetrische Bauweise einer Wendelantenne bedingt einen Reflektor (Grundplatte). Neben der normalen Eindraht-Bauweise (*monofilar*) gibt es weitere spezielle Formen wie beispielsweise die *Bifilar*- oder die *Quadrifilar-Helical-Antenna*. Diese Typen mit ineinander verschachtelten Wendeln weisen im Gegensatz zur einfachen Helix zirkuläre Polarisation nicht nur in Hauptstrahlrichtung, sondern über eine Hemisphäre auf.

**Hohlleiterantennen** (*aperture antennas*) - auch Aperturstrahler, Trichter- oder Hornantennen (*horn antennas*) - werden vor allem dann eingesetzt, wenn höhere Frequenzen über  $1\text{ GHz}$  mit wenig Verlusten abgestrahlt (empfangen) werden sollen. Die Felder werden in einem für die jeweilige Frequenz dimensionierten Gehäuse in Luft geführt, nicht in einem zu Verlusten führenden dielektrisches Medium wie in einem Kabel. Die Übertragung eines Signals in einer Hohlleiterantenne kann auch als eine Mischung zwischen leitungsgebundener Welle und Freiraumübertragung beschrieben werden. Durch ein offenes Ende wirkt der Hohlleiter als Antenne. Deshalb wird er auch als Aperturstrahler bezeichnet. Der Strahler entsteht aus einer Hohlleitung durch das trichterförmige Aufweiten eines Endes. Um bestimmte Strahlungscharakteristika und Forderungen an Gewinn und Impedanz zu erfüllen, werden unterschiedliche Trichterformen gewählt, zum Beispiel das Rechteck-, Sektor- oder Konushorn. Die Strahlungscharakteristik kann zusätzlich durch die Struktur der Oberfläche beeinflusst werden. Auf diese Weise werden beim so genannten Rillenhorn (*corrugated horn*) Effekte durch Kantenbeugung reduziert, tritt eine verbesserte symmetrische Richtcharakteristik auf und wird die Kreuzpolarisation reduziert (*Kraus 1988*). Ein Radom, zum Beispiel eine dünne Folie aus einem verlustarmen Dielektrikum, schützt die Hornantenne meistens gegen Witterungseinflüsse. Hohlleiterantennen werden u.a. auch als Erreger für Spiegel- und Linsenantennen (s.u.) genutzt. Aufgrund der hohen Genauigkeit für die Berechnung des Richtfaktors aus den geometrischen Abmessungen werden Trichterstrahler auch als Eichstrahler bzw. Kalibrierantenne für Gewinnmessungen genutzt. Dies trifft auch für die

Kammerkalibrierung von GPS-Antennen zu, vgl. Abschnitt 5.3 oder *Schupler und Clark (2001)*.

Bei **Reflektor- oder Spiegelantennen** (*reflector antennas*), auch Parabolantennen, wird versucht, mit einem Erreger vor einem Reflektorspiegel eine strahlende Fläche zu erzeugen. Dabei soll eine gerichtete Abstrahlung einer möglichst ebenen Welle (gleichphasige Wellenfront) erreicht werden. Dies kann u.a. mit einem zentral erregten Rotationsparaboloiden (*parabolic reflector*) geschehen. Es existieren auch andere Formen, wie Cassegrain- und Gregory-Antennen, so genannte Subreflektorsysteme (*Suckrow u.a. 1995*). Neben den genannten gekrümmten Reflektoren werden auch planare Bauweisen eingesetzt (*plane, corner reflector*). Die Gruppe der Spiegelantennen wird besonders für lange Übertragungswege wie in der Radioastronomie, Mikrowellen-Kommunikation und Satellitensignalübertragung eingesetzt. Wichtig sind u.a. ein hoher Gewinn bei einem kleinen Öffnungswinkel mit niedrigen Nebenkeulen. Zudem soll eine hohe Kreuzpolarisationsentkopplung und eine geringe Rauschtemperatur vorliegen. Hornstrahler als Erreger oder Empfänger im Brennpunkt eines Reflektors ergeben auf Grund ihrer guten Bündelung und geringer Nebenausstrahlung einen hohen Systemwirkungsgrad durch gezielte Ausleuchtung (*shaping*) des Reflektors (Aperturbelegung). Es sind aber auch Wendel, Microstripantennen u.a. möglich.

Einige Nachteile von Spiegelantennen sind durch **Linsenantennen** (*lens antennas*) zu vermeiden. Diese Antennenform ist eine Kombination aus Strahler, zum Beispiel Horn, und einer Linse. Durch optimale Geometrie und Wahl des Materials kann divergierende Energie in ebene Wellen transformiert werden. Die Linse selbst kann aus einem nicht-metallischen Dielektrikum aus molekularen Partikeln mikroskopischer Größe oder aus einem künstlichen bzw. metallischen Dielektrikum aus diskreten metallischen Partikeln makroskopischer Größe bestehen (*Kraus 1988*). Die Metalle müssen klein gegenüber der Wellenlänge sein, um Resonanzeffekte zu vermeiden. Sie können sphärische Form haben oder aus Streifen, Platten, Stäben u.a. bestehen. Durch die Phasenkorrektur mit einer entsprechenden Abdeckplatte vor einem Hornstrahler kann eine gleichphasige Aperturbelegung erreicht werden. Das Einsatzgebiet der Linsenantennen entspricht dem der Reflektorantennen, speziell für höhere Frequenzen.

**Microstrip- oder Patch-Antennen** (*microstrip or patch antennas*), auch als planare Leiterbahnstrukturen bezeichnet, bestehen in ihrer Grundform aus einer sehr dünnen metallischen Leiterbahn ( $t \ll \lambda$ ), einem gegenüber der zu nutzenden Wellenlänge dünnen Substrat ( $h \ll \lambda$ ) und einer Grundplatte (Abbildung 4.6). Die Leiterbahn, der Patch-Strahler oder Microstrip, wird durch Ätzung oder Siebdruck hergestellt und auf ein Substrat aufgebracht. Diese dielektrische Schicht ( $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ ) trennt Patch und die leitende Masseschicht der Grundplatte. Auf Grund dieser Art der Herstellung findet sich oft die Bezeichnung *printed structure*. Prinzipiell stellt der dreischichtige Aufbau nichts anderes als eine Leitung dar, anschaulich beschrieben durch den englischen Begriff *waveguide*. Im Dielektrikum zwischen Microstrip und Grundplatte wird eine Welle geleitet und übertragen. Durch eine Kürzung des Microstrips endet die Leitung wie eine Apertur, die durch das Ende des Microstrips und die Grundplatte geformt wird. Auf diese Weise ist die Anwendung als strahlendes Element möglich. Die Störung einer homogenen Leiterbahnstruktur, zum Beispiel Änderung bzw. Sprung in der Breite oder speziell auch die Kante der Leiterbahn, fördert ein Abstrahlverhalten. Dieser Effekt wird genutzt. Bei einem rechteckigen Patch bilden sich auf diese Weise Streufelder an den Stirnseiten zwischen Patch und Grundplatte, die sich im Fernfeld zu einem linearen E-Feld addieren. Die Ausbreitungsrichtung ist senkrecht zur Antennenfläche. Es gibt unterschiedlichste Formen von Microstrip-Antennen, u.a. Rechtecke, Quadrate und Kreise, aber auch weitere Sonderformen wie Dreiecke, Ringformen, Ellipsen, Kreissektoren etc.

Die Gruppe der Microstrip-Antennen findet ihren Einsatz in vielfältigen Anwendungen speziell für höhere Frequenzen über 1 GHz. Die umfangreiche Nutzung reicht vom Massenartikel im

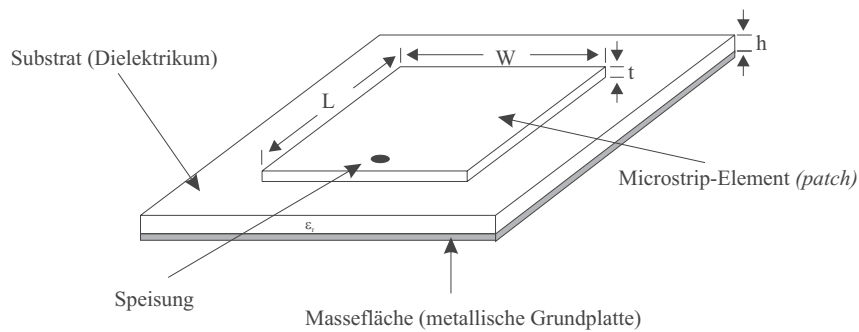


Abbildung 4.6: Beispiel für grundsätzlichen Aufbau einer Microstrip-Antenne (rechteckiger Patch).

Konsumbereich bis hin zu speziellen High-End Antennen für die militärische Nutzung. Beispiele sind Kommunikations- und Navigationsantennen auf Flugzeugen, Raketen, Satelliten und am Boden. Dazu gehören u.a. Altimeter, GPS, Lande- und Radarsysteme, aber auch Mobiltelefone etc. Die Microstrip-Antenne wird im GPS-Bereich am häufigsten genutzt. Aus diesem Grund wird der Antennentyp an dieser Stelle genauer beschrieben. Die unterschiedlichen Bauformen und Designs sind sehr komplex und umfangreich. Im Rahmen einer geodätischen Arbeit führt eine umfassende elektrotechnische Aufarbeitung zu weit. Dafür wird auf weiterführende Literatur speziell zu dieser Thematik verwiesen (z.B. *Pozar und Schaubert 1995, James und Hall 1989*). Es sollen kurz Vor- und Nachteile dieses Antennentyps, einige Details und Charakteristika der Konstruktion wie Speisung und Erzeugung von zirkular polarisierten Wellen vorgestellt werden. Die Hauptvorteile des Microstrips liegen in seiner Bauweise. Er hat eine sehr geringe Bauhöhe und ein sehr geringes Gewicht bei trotzdem vergleichsweise effizienter Abstrahlung. Die Antenne kann auf verschiedene - auch nicht-planare - Oberflächenformen aufgebracht werden (*conformal antenna*). Zudem ist die Herstellung relativ einfach und vor allem vergleichsweise günstig. Dies gilt auch für so genannte *antenna arrays* (vgl. nächsten Absatz). Weiterhin können verschiedene Polarisationen erzeugt werden. Eine genaue numerische Analyse des Strahlungsverhalten verschiedener Konstruktionen ist möglich, was lange Zeit nicht der Fall war. Für diese mathematische Modellierung werden heutzutage CAD-Systeme eingesetzt. Den Vorteilen stehen einige Nachteile gegenüber. Dazu gehören die typischerweise schmale Bandbreite, geringe Effizienz durch dielektrische Verluste v.a. bei *antenna arrays* (Leistungsumsetzung in Wärme), mögliche Strahlung durch die Speisung bzw. das Speisernetzwerk, Ungenauigkeiten durch Variationen von Substrateigenschaften (Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$ , Temperaturabhängigkeiten) etc. Bei Antennen für hohe Sendeleistungen wird auch Luft als „Träger“ genutzt. Die Microstrip-Struktur wird dabei durch eine vor einer Massefläche befestigten Metallplatte erreicht. Für eine Förderung der Abstrahlung werden bei der üblichen Anwendung von dielektrischen Substraten normalerweise Materialien mit einer kleinen Dielektrizitätszahl vorgezogen. Mit Zunahme der Dicke des Materials nimmt die Strahlung und somit der Wirkungsgrad durch leichtere Ablösung an den Kanten zu. Weiterhin ist die Bandbreite höher als bei dünneren Substraten mit höherer Dielektrizitätszahl, bei denen aber die Patchgröße kleiner sein und ungewollte Abstrahlung vermindert werden kann. Für die Abstimmung des Abstrahlverhaltens (s.u.) der Microstrip-Antenne ist neben der Form und Größe des Elementes und dem Substrat noch die Speisung verantwortlich. Es gibt vier am häufigsten verbreitete Arten jeweils mit Vor- und Nachteilen (*Balanis 1997*). Eine einfache Art ist die Koaxial-Speisung (*coax feed, coaxial probe*), bei dem das Koaxial-Kabel durch Grundplatte und Substrat zum Microstrip geführt wird. Bei der Microstrip-Speisung (*microstrip line feed*) ge-

hört die Zuleitung selbst zum Microstrip und geht entweder direkt von der Patch-Kante ab (*edge feed*) bzw. wird in einer Aussparung etwas in den Patch hineingeführt (*inset feed*). Zuleitung und Patch sind ein Teil. Eine kompliziertere Methode ist die Speisung durch eine Apertur-Kopplung (*aperture-coupled feed*). Dabei befindet sich unter der Grundplatte eine zweite Substratschicht mit einer Microstrip-Speisung. Die Kopplung der elektromagnetischen Energie mit dem oberen Patch wird durch eine Öffnung in der Grundplatte (Apertur) gewährleistet. Bei der vierten Art der Speisung werden auch zwei Substratschichten genutzt, wobei sich die Grundplatte unterhalb der unteren Schicht befindet. Eine Microstrip-Speisung befindet sich auf der unteren Schicht. Eine Kopplung zur oberen Schicht mit dem Patch entsteht durch die Nähe zwischen Speisung und Patch (*proximity-coupled feed*).

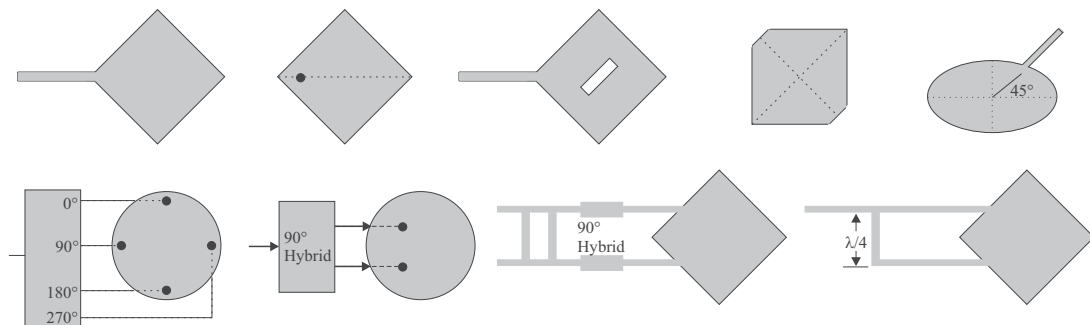


Abbildung 4.7: Beispiele möglicher Konstruktionsformen für zirkular polarisierte Microstrip-Antennen (nach *James und Hall 1989* und *Balanis 1997*). Neben unterschiedlichen Formen werden auch verschiedene Speisungsarten genutzt (*single, dual, multiple feed*).

Patch-Konstruktionen sind gut für eine einfache Realisierung zirkular polarisierter Wellen geeignet. Normalerweise werden primär linear polarisierte Wellen erzeugt. Durch verschiedene Speisungsmethoden und geringfügige Veränderungen der Patch-Elemente (Abbildung 4.7) können zwei zueinander senkrecht stehende E-Felder mit einer Phasenverschiebung von  $90^\circ$  Grad angeregt werden, und es entstehen zirkular bzw. elliptisch polarisierte Wellen. Eine einfache Möglichkeit bei einem quadratischen Patch ist die Speisung durch ein äußeres Netzwerk (*power divider, hybrid*) an zwei Stellen (*dual feed*). Beim runden Patch müssen die zwei Speisepunkte einen entsprechenden Winkelabstand haben. Hier kann auch eine Speisung an vier Punkten erfolgen (*four-point feeding*), wodurch Kreuzpolarisation vermieden wird. Zudem ist auf diese Art theoretisch ein Null-Lageoffset (vgl. Abschnitt 4.4.2) zu erreichen (*Tatarnikov 2001*). Die benötigte Phasenverschiebung lässt sich bei der einfachen Speisung (*single feed*) an einem bestimmten Ort des Patches wesentlich einfacher auch ohne Netzwerk erzeugen. Sie wird mit einer geringfügigen Verstimmung der zugehörigen Resonanzfrequenzen durch eine leichte Unsymmetrie im Patch-Aufbau erreicht (*Balanis 1997*). Die im Allgemeinen sehr schmalbandigen Microstrip-Antennen können in ihrer Bandbreite durch Kopplung von Elementen, vergrößert werden. Die Elemente können übereinander in Schichten (*stacked patches*) oder aber nebeneinander (*parasitic elements*) angeordnet werden. Die verschiedenen Elemente werden innerhalb des Übertragungsbandes jeweils auf eine etwas andere Resonanzfrequenz abgestimmt. Auf gleiche Weise werden auch Zweifrequenzantennen hergestellt.

Die letzte der oben aufgezählten Antennentypen ist die Gruppe der **Mehrelementantennen** (*array antennas*). Diese werden normalerweise genutzt, wenn eine bestimmte Strahlungscharakteristik nicht mit einem Element zu erreichen ist. Häufig sind die einzelnen Elemente aus praktischen Gründen identisch. Dies ist aber keine Notwendigkeit. Die individuellen Elemente

eines Arrays können von jeglicher Bauart sein (Drahtantennen, Aperturen, Microstrip-Antennen etc.). Mit einer Array-Konstruktion kann die Richtwirkung und der Gewinn bei gleichzeitig verbessertem Störabstand verbessert werden. Zu dieser Gruppe von Antennen gehören auch die so genannten phasengesteuerten Richtantennen (*phased arrays*). Dabei wird das Richtdiagramm von feststehenden Antennengruppen durch eine Phasensteuerung verschwenkt (*Stirner 1980*). Dazu werden die Phasendifferenzen zwischen den einzelnen Elementen (heutzutage) rechnergestützt kontrolliert, wodurch die maximale Strahlung in jegliche gewünschte Richtung gelegt werden kann (*scanning array*). Derartige Antennen werden besonders in sensiviten militärischen und flugtechnischen Bereichen eingesetzt, zum Beispiel bei Radaranlagen. In GPS-Anwendungen werden durch das beschriebene Verfahren, das *digital beam steering*, Multipath und andere Störungen (*jamming*) aus bestimmten Richtungen ausgeblendet, u.a. für die Referenzstationen bei kritischen Navigationsaufgaben (hochgenaue Landeanflüge etc.).

In manchen Fällen ist eine Einordnung einer Antenne in die oben genannten Gruppen schwierig. Teilweise werden in der Literatur bestimmte Konstruktionen als eigene Antennenform bzw. zugehörig zu anderen Gruppen beschrieben. Einige Beispiele sollen an dieser Stelle kurz genannt werden. **Schlitzantennen** (*slot antennas*) werden häufig als eigene Bauform bezeichnet. Ihr Aufbau ist komplementär zu den bisher gezeigten Antennen. Die Strahlungscharakteristik ist vergleichbar mit einem Dipol. Schlitzantennen können als Hohlleiter oder Patch hergestellt werden. So wirkt ein Spalt innerhalb einer großen Metallplatte auch als Antenne. Abstrahlung kann immer dort auftreten, wo Inhomogenitäten in einer sonst homogenen Umgebung vorkommen. Dieser normalerweise unerwünschte Effekt wird bei dieser Antenne zur definierten Energieabstrahlung ausgenutzt. Die elektrischen Eigenschaften der Abstrahlung an einem Schlitz werden durch das Babinetsche Prinzip beschrieben (*Kraus 1988*). Auch **Spiralantennen** können nicht unbedingt nur einer der o.g. Gruppen zugeordnet werden. So gibt es sie als Draht-, Schlitz- oder als Patchantennen. Dabei gibt es die planaren und die konischen Spiralantennen (Abwicklung auf einem Kegel), wobei hinsichtlich der speziellen Bauweise zwischen archimedischen und logarithmischen Spiralen unterschieden wird. Hauptcharakteristik der Spiralantennen ist - neben der Abstrahlung von zirkular polarisierten Wellen - ihre extreme Breitbandigkeit.

Zu einer Übersicht der verschiedenen Konstruktionsformen gehört schließlich die Thematik der Abstimmung einer Antenne, einem wichtigsten Schritt der Antennenkonstruktion. Erst hierdurch wird das präzise Arbeiten für bestimmte Frequenzen ermöglicht, und es werden die Strahlungseigenschaften festgelegt. Die Funktion eines Antennensystems über einen bestimmten Frequenzbereich ist nicht allein vom Antennenelement abhängig, sondern vom Frequenzverhalten der Kombination aus Antennenelement und Speiseleitung. Der Eingangswiderstand des Antennenelementes weicht häufig vom Wellenwiderstand der Speiseleitung ab. Zur Vermeidung von stehenden Wellen auf der Speiseleitung erfolgt eine Abstimmung über Anpassungsschaltungen (*Stirner 1980*). Man spricht auch von Leistungsanpassung (*matching*), wenn die Leitungswelle völlig im Abschlusswiderstand absorbiert wird. Ein Maß für die Anpassungsgüte ist der Welligkeitsfaktor (*Voltage Standing Wave Ratio VSWR*), der als Funktion von ankommendem und reflektiertem Signal beschrieben werden kann. Eine Anpassung ohne Reflektionen würde ein VSWR von 1 : 1 ergeben. Ein guter Wert liegt bei 1.5 : 1. Für eine detaillierte Aufarbeitung dieses Komplexes ist eine tiefgehende Behandlung von Hochfrequenzleitungen, komplexen Widerständen, Grundlagen der so genannten Vierpoltheorie (*Suckrow u.a. 1995*) etc. erforderlich. Zusammenfassend genügt die Beschreibung, dass eine Abstimmung der Widerstände von Antennenelement und Speiseleitung erforderlich ist. Weiterhin ist die Fußpunktimpedanz, also der Eingangswiderstand des Antennensystems, frequenzabhängig (dispersiv). Von diesem Frequenzverhalten hängt schließlich die Bandbreite der Antenne ab. Im resonanten System Antenne ändern sich Strom- und Spannungsverhältnisse mit der Frequenz, somit auch die Eingangsimpedanz und folglich die



Strahlungseigenschaften. Es wird deutlich, dass die Konstruktion einer Antenne eine komplexe Thematik mit vielen voneinander abhängigen Einflussparametern ist.

### 4.3 Exkurs: Leistungsbilanz Funkverbindung Satellit-Empfänger

Anhand des Übertragungsweges der GPS-Signale wird in diesem Exkurs die Leistungsbilanz beleuchtet. Ausgehend von der Satelliten-Antenne, über den Übertragungsweg bis zur Empfangsantenne wird die Art und Arbeitsweise der beteiligten Antennen und die Dämpfung auf dem Signalweg dargestellt.

Die im L-Band abstrahlenden GPS-Antennen der aktuellen Satellitengenerationen bestehen aus einem *phased array*, welches aus zwei konzentrischen Kreisen von Helix-Antennen aufgebaut ist (Aparicio u.a. 1996). Der innere Ring besteht aus vier, der äußere Ring aus acht Elementen. Geringe Unterschiede zwischen Block I, II/IIA und IIR bestehen u.a. in den Durchmessern der Ringe, dem Radius und der Länge der Helix-Elemente, der Art der Helix, beispielsweise betreffend der Abwicklung - *tapered* - der letzten zwei Windungen auf einem Kegel ab Block II, und der Art des Reflektors (zum Beispiel zylindrische bzw. konische Grundplatte - *cup* - in Becherform). Das *antenna pattern* hinsichtlich der Signal-Amplitude ist speziell geformt. Die passive, breitbandige Satelliten-Antenne besitzt eine spezielle Strahlungskeule, um die gesamte Erdoberfläche mit einer möglichst gleichförmigen Signalstärke zu überdecken. Von der Bahnhöhe des Satelliten gesehen beträgt der Winkel zwischen beiden Seiten der Erde ungefähr  $27.7^\circ$ . Somit beträgt der Winkel zwischen Satellit am Horizont und im Zenit ungefähr  $13.9^\circ$ . Tatsächlich ist der Winkel größer ( $21.3^\circ$  für  $L_1$  und  $23.4^\circ$  für  $L_2$ ), sodass die Signale - sofern außerhalb des Erdschattens - auch durch Empfangseinheiten auf anderen Satelliten in der Nähe der Hauptkeule genutzt werden können (Spilker 1996a). Neben diesem Winkel der Strahlungskeule ist die Signalstärke speziell abgestimmt, da Verluste von der Entfernung zwischen Antenne und Erdoberfläche abhängen. Diese sind minimal für einen Satelliten im Zenit und maximal für einen Satelliten am Horizont. Der Entfernungsdifferenz von ca. 500 km für diese zwei Extremwerte entspricht ungefähr ein Verlust von 2.1 dB. Dementsprechend ist das Design der Signalstärke abgestimmt (*shaped pattern*). Es gibt ein ringförmiges Maximum im Gewinn bei etwa  $10^\circ$  von der Mitte, so dass eine Vertiefung der Sendekeule in Hauptstrahlrichtung entsteht (-2.1 dB). Auf diese Weise werden die Verluste durch längere Signalwege durch das Signaldesign so ausgeglichen, dass unabhängig vom Empfangsort auf der Erde eine möglichst gleichförmige Signalstärke vorhanden ist. Dies geschieht durch die spezielle Konstruktion des Antennenarrays aus zwei Helix-Ringen mit einem speziellen passiven Speisetzwerk für die Phasen- und Amplitudensteuerung der einzelnen Elemente. Die Elemente des inneren Rings werden in Phase mit 90 % der Leistung, die des äußeren Ringes  $180^\circ$  phasenverschoben mit 10 % der Leistung gespeist. Es entsteht ein rechtshändig zirkular polarisiertes Signal über das Frequenzband 1200-1600 MHz. Die maximale Abweichung von einem perfekten RHCP-Signal liegt innerhalb der Hauptstrahlungskeule nicht mehr als 1.2 dB für  $L_1$  und 3.2 dB für  $L_2$  innerhalb von  $\pm 14.3^\circ$  von der Hauptstrahlrichtung (ARINC 1991). Im Gegensatz zum genau bekannten *amplitude pattern* ist das *phase pattern*, also das exakte Verhalten des Phasenzentrums für die einzelnen Frequenzen, weniger präzise bestimmt (Abschnitt 8.3).

Anders als die aktuellen Satelliten-Antennen von GPS sind für die Satelliten des zukünftigen europäischen GALILEO-Systems planare Antennen geplant (Benedicto u.a. 2000). Hierdurch sollen kleine Bauserien zu geringeren Kosten ermöglicht werden. Ein mögliches Modell besteht aus so genannten *4-level stacked patches* (vgl. Vorabschnitt). Dazu werden unabhängige Speisetzwerke für die jeweiligen Frequenzbänder benötigt. Diese *beam forming networks* sind direkt im

rückwärtigen Antennenbereich untergebracht, was eine erhebliche Massen- und Volumenersparnis ermöglicht.

Die Wahl von RHCP-Signalen für GPS ist im Faraday-Effekt begründet (*Klobuchar 1996*). Eine linear polarisierte EM-Welle im Frequenzbereich höher als 100 MHz erfährt eine Drehung ihrer Polarisationssebene in der Ionosphäre (*Faraday Rotation*) auf Grund des Erdmagnetfeldes. Es ergibt sich eine Proportionalität dieser Rotation zum Elektronengehalt und zur magnetischen Feldstärke, außerdem eine umgekehrte Proportionalität zum Quadrat der Signalfrequenz (*Davies 1990*). Aufgrund der Abnahme des Einflusses des Erdmagnetfeldes mit zunehmender Höhe haben Elektronen in sehr großer Höhe kaum noch einen Effekt auf die Faraday-Rotation, sodass es sich um den Bereich zwischen der unteren Grenze der Ionosphäre von 50 km und ca. 2000 km handelt. Würden linear polarisierte Wellen ausgestrahlt, so könnte bei einer Rotation von  $90^\circ$  theoretisch eine totale Entkopplung entstehen. Tatsächlich könnte bei einer Differenz der Polarisationssebenen zweier linear polarisierter Wellen von fast  $90^\circ$  ein Verlust von 30 dB auftreten. Aus diesem Grunde wurden zirkular polarisierte Signale gewählt, da die Faraday-Rotation somit kein Problem darstellt. Es müssen auf Sende- und auf Empfangsseite entsprechend polarisierte Antennen genutzt werden (kopolar, gleicher Drehsinn), um maximale Leistung zu übertragen bzw. Verluste gering zu halten (Tabelle 4.1).

Die technischen Details der Satelliten-Antenne sind auch Ausgangspunkt für die gesamte Leistungsbilanz der GPS-Signale (*ARINC 1991*). Die Bilanz zwischen Satellit und Nutzer auf der Erde hat ihren Bezugspunkt in einer notwendigen Empfangsleistung (dBW, entspricht dB in Bezug zur Leistung 1 W). Diese spezifizierte GPS-Trägerleistung bezieht sich auf eine linear polarisierte Antenne mit 3 dB Gewinn. Die Umrechnung auf einen Antennengewinn von 0 dB und auf eine RHCP-Antenne (Tabelle 4.2) ergibt nur eine wenig stärkere als die als Minimum spezifizierte erforderliche Empfangsleistung (*Ward 1996*). Die Werte sind konservativ vorgegeben und für das Ende der Satellitenlebenszeit zutreffend. Tatsächlich überschreiten diese Werte nicht -153.0 dBW ( $L_1$ -C/A) bzw. -155.5 dBW ( $L_1$ -P(Y)) bzw. -158.0 dBW ( $L_2$ ). Die maximalen Änderungen im Verlauf der Satellitenlebenszeit liegen bei 7.0 dB ( $L_1$ -C/A), 7.5 dB ( $L_1$ -P(Y)) und 8.0 dB ( $L_2$ ). Neben der Abnahme der Sendeleistung des Satelliten durch Alterung und somit auch Abnahme der Empfangsleistung sinkt diese auch, wenn der Satellit im Erdschatten steht. Die Minimalwerte liegen auf Grund der speziellen Form des Gewinns der Strahlungskeule (*shaped beam pattern*) bei  $5^\circ$  und  $90^\circ$  Elevation des Satelliten über dem Horizont der Empfangsantenne (Maximum ca.  $40^\circ$ ).

Tabelle 4.2: Erforderliche GPS-Empfangsleistung. Entspricht Minimalwert (Satellit am Horizont) der Trägerleistung des GPS-Signals an der Erdoberfläche.

Parameter	$L_1$ -C/A	$L_1$ -P(Y)	$L_2$ -C/A o. -P(Y)
Min. Empfangsleistung (linear polarisierte Antenne mit 3 dB Gewinn)	-160.0 dBW	-163.0 dBW	-166.0 dBW
Umrechnung auf 0 dB Antennengewinn	-3.0 dB	-3.0 dB	-3.0 dB
Umrechnung auf RHCP-Antenne	3.4 dB	3.4 dB	3.8 dB
Min. Empfangsleistung (RHCP-Antenne)	-159.6 dBW	-162.6 dBW	-165.2 dBW

In der Gesamtbilanz (Beispiel in Abbildung 4.8) wird der Zusammenhang zwischen der GPS-Trägerleistung an der Erdoberfläche (vorgegebener Minimalwert) und der Sendeleistung des Satelliten hergestellt. Im Folgenden wird dies am Beispiel des mit dem C/A-Code modulierten

$L_1$ -Trägersignals dargestellt. Eine umfassende Übersicht findet sich neben dem *ICD-GPS-200* auch in *Ward (1996)*, die logarithmischen Berechnungen u.a. in *Eisfeller (1997)*. Die Sendeleistung des GPS-Satelliten beträgt etwa 13.4 dBW bzw. 21.88 W. Zusammen mit dem Gewinn der Sendeantenne - im schlechtesten Fall 13.4 dB für  $14.3^\circ$  aus der Hauptstrahlrichtung - ergibt sich die äquivalente Strahlungsleistung EIRP (*Effektive Isotropically Radiated Power*) zu 26.8 dBW. Diese entspricht der Leistung, die ein Kugelstrahler am Sendeort aussenden müsste, um am Empfangsort eine gleiche Feldstärke zu erzeugen. In die Bilanz der Übertragungsstrecke gehören schließlich die atmosphärische Dämpfung (maximal 2.0 dB), Verluste durch Polarisationsanpassung (maximal 3.4 dB) und die Freiraumdämpfung. Letztere ist abhängig von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger. Ein isotroper Strahler würde die abgestrahlte Leistung gleichmäßig auf einer Kugeloberfläche verteilen. Mit wachsendem Abstand würde diese Oberfläche größer und die Strahlungsdichte somit kleiner. Bei der maximalen Entfernung des Satelliten (am Horizont) von ca. 26578 km beträgt dieser scheinbare Leistungsverlust 184.4 dB. Unter Berücksichtigung des Gewinns der Empfangsantenne (3.0 dB) ergibt sich in der Gesamtbilanz schließlich der vorgegebene Minimalwert der Leistung am Empfängereingang von -160.0 dBW (vgl. Tabelle 4.2).

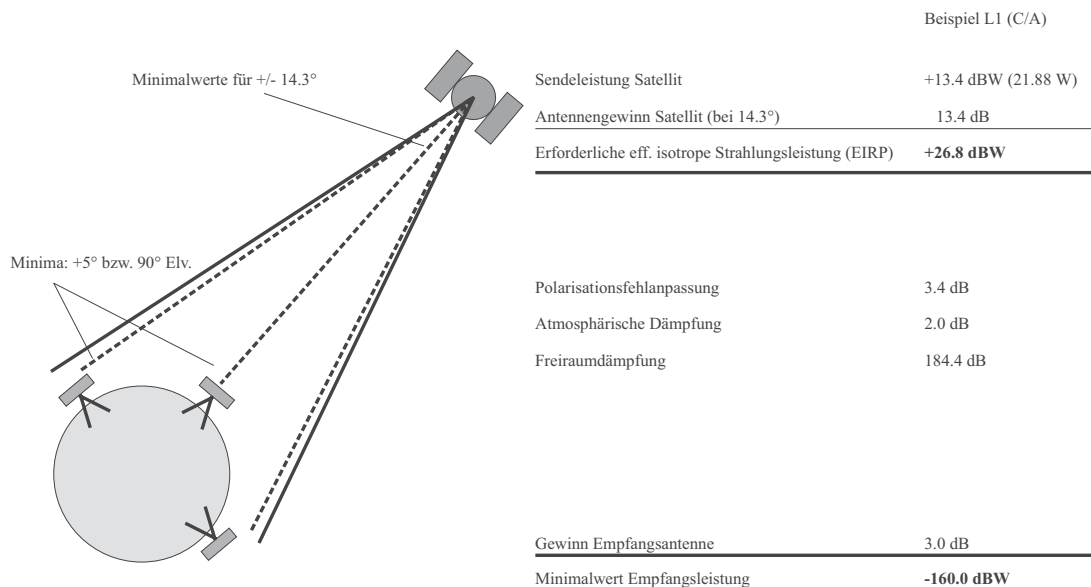


Abbildung 4.8: GPS-Leistungsbilanz zwischen Satellit und Nutzer. Beispielwerte für Träger  $L_1$  (C/A) (nach *Ward 1996*).

Die Aufgabe der Empfangsantenne ist es, einem Empfänger einen möglichst großen Teil aus der Energieströmung der vorbeiwandernden elektromagnetischen Welle zuzuführen. Die Möglichkeit der Nutzung der sehr schwachen GPS-Signale ohne riesige Antennenkonstruktionen ist prinzipiell in der GPS-Signalstruktur (*spread spectrum*) und somit in der speziellen empfängerseitigen Signalverarbeitung begründet. Trotzdem - auf Grund der sehr geringen Empfangsleistung und weiteren Verlusten wie durch das Antennenkabel - wird das von der Antenne aufgenommene hochfrequente Signal (*radio frequency RF signal*) vorverstärkt. Die hauptsächliche Verstärkung und die Signalverarbeitung wird nach einer Frequenzumsetzung in einem niedrigeren Frequenzbereich (*intermediate frequency IF signal*) im Empfänger selbst durchgeführt (*Langley 1998b*). Der Vorverstärker ist meist im Antennengehäuse integriert und beinhaltet neben dem *Low Noise Amplifier (LNA)* auch Filter gegen Signale außerhalb der GPS-Frequenzbänder (*Van Dierendonck 1996*).

Durch diese Integration kann ein relativ günstiges Signal-Rausch-Verhältnis (*signal-to-noise-ratio*  $S/N$ ) für das Empfangssignal gewährleistet werden. Für trägermodulierte Signale heißt der Abstand des Trägers zum Rauschen *carrier-to-noise-ratio*  $C/N$ . Das Verhältnis wird auch als Störabstand bezeichnet (*Eisfeller 1997*), da nicht das Absolutniveau des Signales, sondern der Abstand des Nutzsignales zum Störgeräusch die Empfangsqualität bestimmt. Ein Vorverstärker erhöht - wie jede weitere Komponente im Signalweg nach der Antenne - den Rauschanteil. Details zu aktiven Antennen finden sich beispielsweise in *Suckrow u. a. (1995)*, spezielle Einzelheiten bezüglich der GPS-Empfangskomponente in *Langley (1997a)*.

## 4.4 Beschreibung des Empfangsverhaltens von GPS-Antennen

### 4.4.1 Allgemeine Charakteristika von GPS-Antennen

Die vielfältigen Einflussparameter, die für das Erreichen spezieller Empfangseigenschaften einer Antennenkonstruktion abgestimmt werden müssen, wurden bereits in Abschnitt 4.2.2 angesprochen. In Abschnitt 4.2.3 wurden unterschiedliche Antennentypen und ihre Konstruktionseigenschaften charakterisiert. Die GPS-Leistungsbilanz mit den beteiligten Sende- und Empfangsantennen wurde im Vorabschnitt 4.3 beschrieben. An dieser Stelle werden speziell Merkmale der GPS-Empfangsantennen, Entwicklungen, Eigenschaften und aktuelle Konstruktionen zusammengefasst. Die Charakteristika und das Empfangsverhalten der Antenne setzt letztlich die Grenze für die Güte des gesamten Empfangssystems.

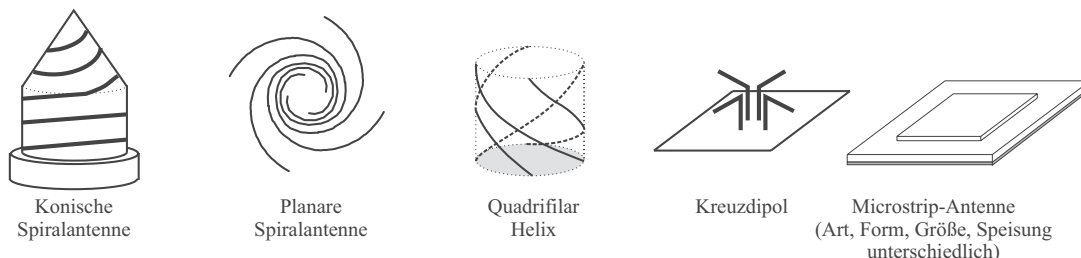


Abbildung 4.9: Verschiedene für den GPS-Einsatz genutzte Antennentypen. Die Vielzahl unterschiedlicher GPS-Antennen lassen sich auf einige wenige Grundformen reduzieren.

Die GPS-Empfangsantenne ist auf RHCP-Signale der  $L_1$ - und bei Zweifrequenzantennen auch der  $L_2$ -Frequenz abgestimmt. Bei einer Erweiterung der Signale um eine dritte zivile Frequenz  $L_5$  (Abschnitt 2.1) werden sicherlich noch Änderungen an Empfangselementen und/oder - auf Grund der integrierten Filter - an Vorverstärkern vorgenommen (*Schupler und Clark 2001*). Übersichten über aktuell verwendete GPS-Antennen verschiedener Firmen für diverse Anwendungsbereiche zeigen mehr als 240 unterschiedliche Antennen von ungefähr 30 Firmen auf dem Markt (*GPS World 2003*). Dabei ergeben sich ständig Änderungen und Neuerungen auf Grund neuer Firmenkonstellationen und neuer Entwicklungen. Die geodätische Zweifrequenzantenne für hochpräzise Anwendungen nimmt am Gesamtvolumen des Marktes nur einen kleineren Anteil ein. Dies ist speziell in ihren - verglichen mit einfachen Empfangssystemen für Navigationsanwendungen - hohen Herstellungskosten begründet.

Trotz der Vielzahl verschiedener Typen lassen sich die beim GPS eingesetzten Antennen auf wenige bestimmte Grundformen von Empfangselementen für zirkular polarisierte Wellen zu-

rückführen (Abbildung 4.9). Variationen der Grundplatte wie die Nutzungen eines Choke Rings werden extra betrachtet. Zu den Antennentypen gehören

- Spiral- oder Helix-Konstruktionen
- Monopol-, Dipol-Konfigurationen
- Microstrip-Antennen.

Zu den ersten geodätischen GPS-Antennen zählten konische Spiralantennen (*conical spiral*). Dabei wird die Spirale auf einem Kegel abgewickelt (*tapered helical*). Die Antenne war sehr breitbandig, sodass das gesamte Frequenzband zwischen  $L_2$  und  $L_1$  abgedeckt wurde. Ein bekannter Typ zu Beginn der präzisen Nutzung von GPS im zivilen Bereich war die Antenne des TI4100 (*Sims 1985*). Zu den im GPS-Bereich genutzten Wendelantennen gehört die Quadrifilar Helix (*quadrifilar helical, volute*), bestehend aus ineinander verschachtelten Wendeln. Dieser Typ wird als Einfrequenzantenne eingesetzt und benötigt prinzipiell keine Grundplatte. Eine erste geodätisch genutzte Antenne dieser Gruppe war die WM101-Antenne (*Tranquilla und Colpitts 1989*). Andere Antennen dieses Typs werden heute vielfach in Handheld-Empfängern eingesetzt. Monopol- bzw. Dipol-Konstruktionen benötigen eine Grundplatte. Sie sind relativ einfach und kompakt herzustellen. Grundsätzlich als Einfrequenzantenne hergestellt, werden diese Typen mit entsprechender Konstruktion und Anpassung auch für Zweifrequenzanwendungen entwickelt. Als Beispiel sei das Dorne-Margolin Element C146 genannt, welches bereits sehr früh für hochpräzise GPS-Anwendungen entwickelt und eingesetzt wurde (*Tranquilla u.a. 1989*). Dieses Element wird auf Grund seines stabilen Phasenzentrums und seiner guten Empfangseigenschaften von verschiedenen Firmen mit zugehörigem Choke Ring als Referenzstationsantenne angeboten.

Zur Gruppe der Microstrip-Antennen gehören prozentual die meisten aller zur Zeit eingesetzten GPS-Antennen. Dies gilt für hochpräzise geodätische Zweifrequenzantennen genauso wie für relativ einfache Navigationsempfänger. Auf Grund ihres flachen Profils und ihrer sehr günstigen Herstellung haben sie sich trotz einiger Nachteile wie relativ schwachem Gewinn (vgl. Abschnitt 4.2.3) durchgesetzt. Sie werden in sehr verschiedenen Bauweisen je nach Art des Anwendungsgebietes hergestellt. Dabei weichen Aufbau und Form, aber auch Speisung etc. voneinander ab. Es werden u.a. kreisförmige, rechteckige, ringförmige Elemente sowie auch Schlitzantennen (*slot antennas*) genutzt. Teilweise können moderne Antennen nicht nur einer dieser Gruppen zugeordnet werden, sondern weisen Empfangselemente mit verschiedenen Konstruktionsmerkmalen auf. Ein Beispiel ist eine planare Spiralantenne bestehend aus mehreren Armen (Mehrelementantenne), konstruiert als Schlitzantenne unter Nutzung einer Apertur-Kopplung (*Kunysz 2000b*).

Im Allgemeinen wird von einer GPS-Antenne für hochpräzise geodätische Anwendungen ein Empfang nur über die gesamte obere Hemisphäre bei gleichzeitiger Vermeidung von Mehrwegeeffekten gewünscht. Das Strahlungsverhalten - hierbei wird das *amplitude pattern* also der Gewinn gemeint - wird meist als *omnidirectional* und/oder *hemispherical* beschrieben. Dabei wird *omnidirectional* in der Regel für die horizontale Komponente auf ein ungerichtetes und *hemispherical* für die vertikale Komponente auf ein halbkugelförmiges gerichtetes Empfangsverhalten bezogen. Teilweise kann für spezielle Anwendungen, zum Beispiel dynamische marine Anwendungen, auch eine andere Form der Strahlungskeule gefordert sein.

Die Gründe für - auch gewollte - Abweichungen einer Antenne vom Verhalten eines Punktstrahlers liegen in der Konstruktion und dem Zusammenspiel der gesamten Antenneneinheit. Sie betreffen zum Beispiel (*Tranquilla und Colpitts 1989*):

- Art, Form, Größe und Anzahl (*arrays*) der Antennenelemente
- Speisung
- Grundplatte
- Radom bzw. Dome-Konstruktion

Die Beschreibung und Unterscheidung verschiedener Antennen erfolgt über die bekannten Charakteristika wie Axialverhältnis, Gewinn, Impedanz, Anpassung VSWR, Bandbreite, aber auch Angaben zu LNA, Grundplatte etc. und nicht zuletzt zum Phasenzentrum.

Die GPS-Antenne sollte für einen maximalen Empfang der RHCP-Signale über die gesamte obere Hemisphäre möglichst vollständig rechtshändig polarisiert sein. Einerseits wird so zusätzliche Dämpfung vermieden. Beispielsweise bewirkt die Verwendung einer linear polarisierten Antenne 3 dB Verlust (Tabelle 4.1). Andererseits kann der Empfang von LHCP-Mehrwegesignalen unterdrückt werden. Tatsächlich ist dies nicht zu realisieren. Es ergibt sich immer eine spezielle Richtcharakteristik für die Polarisation. Die Elliptizität der Polarisation wird typischerweise durch das Axialverhältnis (*axial ratio*) beschrieben. Ein AR von 1 entspricht einer perfekten RHCP-Polarisation für die Antenne (0 dB) und somit einer unendlichen Dämpfung von LHCP-Signalen (*Kunysz 1998*). Hochwertige Antennen haben für den Zenit Werte von 2 dB oder besser. Oberhalb von 10 ° sollten Werte kleiner als 3 dB erreicht werden. Teilweise treten am Horizont wesentlich schlechtere Werte auf, was u.a. den Empfang von LHCP-Mehrwegesignalen erleichtert. Dieses wird durch ein scharfes Abfallen des *amplitude pattern* an dieser Stelle gemindert.

Diese Richtcharakteristik der Signalstärke bzw. als integrale Aussage der Gewinn (*gain*) beschreibt das Empfangsverhalten für alle Richtungen. Je nach Konstruktion unterscheiden sich die Antennen hier von einem hemisphärischen Empfang, bis hin zu stark gerichteten Strahlungskeulen für spezielle Anwendungen, zum Beispiel durch so genannte *adaptive antenna arrays* (*Williams u.a. 2000*) oder *digital beam steering with phased arrays* (*Brown 2001*) zur Vermeidung von Mehrwegeeffekten, Interferenzsignalen und Jamming. Typischerweise liegt der Gewinn verglichen mit einem - hypothetischen - zirkular polarisierten isotropen Referenzstrahler (dBic) bei einigen wenigen dB im Zenit und fällt dann um einige dB (ca. 10-15 dB) zum Horizont ab. Die Gesamtänderung von Zenit bis unterhalb der Grundplatte ist wesentlich größer, da eine Richtwirkung mit entsprechendem Vor-Rückverhältnis für die obere Hemisphäre vorliegen und unterhalb des Empfangselementes möglichst kein Empfang stattfinden soll. Bei der Form der jeweiligen Strahlungskeule (Abnahme des Empfangs zum Horizont) unterscheiden sich die Hersteller individuell je nach Konstruktion des Empfangselementes und Art, Abstand, Größe der Grundplatte.

Eine Grundplatte (*ground plane, GP*) ist bei einigen Antennentypen integraler Bestandteil des Empfangselementes, zum Beispiel bei der Microstrip-Antenne. So haben kleinste Rover-Patch-Antennen eine Grundplatte. Zu unterscheiden ist die üblicherweise gemeinte erweiterte Grundplatte. Die Grundplatte bewirkt für den Bereich kleiner Elevationswinkel eine abnehmende Gewinn-Charakteristik und beeinflusst so den (Nicht-)Empfang von Mehrwege-Signalen. Für Signale in höheren Elevationsbereichen ist sie für das Mehrwege-Problem praktisch nicht von Bedeutung. Dort spielt die RHCP-Polarisation die dominierende Rolle. Allerdings wird mit zunehmender Größe der Grundplatte der Gewinn im Zenit vergrößert, Rückstrahlung vermieden und somit über das so genannte *beam-shaping* die Richtwirkung verändert. Für Mehrwege-Signale von unten (Bodenreflektion etc.) hat sie keine diskriminierende Wirkung. Metallische Oberflächen erlauben die Ausbreitung von Oberflächenwellen, die u.a. durch Diffraktionseffekte an Kanten

oder Ecken der Grundplatte entstehen. Zur Vermeidung dieser Effekte wurden bereits zu Beginn der Nutzung von GPS für hochpräzise Anwendungen verschiedene Konzepte entwickelt und getestet (*Tranquilla u. a. 1989*). Daraus ist ein immer noch sehr verbreiteter Choke Ring entstanden (Durchmesser ungefähr  $2\lambda$ ). Ein Choke Ring besteht aus mehreren konzentrischen Ringen mit einer jeweiligen Tiefe von  $\lambda/4$ . Das Empfangselement befindet sich zentrisch im Choke Ring. Die Vertiefungen haben - außer der o.g. Gewinnreduzierung für niedrige Elevationsbereiche - keinerlei Effekt auf direkte Signale. Für Signale von hochstehenden Satelliten wirkt der Choke Ring wie eine flache Grundplatte. Ein spezielle Wirkung ergibt sich für die vom Boden reflektierten Signale. Die Oberflächenwellen können hier durch zwei Anteile beschrieben werden, den primären und sekundären Wellen (Abbildung 4.10) mit jeweils gleicher Amplitude. Aufgrund des Durchlaufens der  $\lambda/4$ -Vertiefungen der Sekundärwelle und entsprechender Wegdifferenz entsteht eine  $180^\circ$ -Phasenverschiebung beider Anteile. Somit kann eine Auslöschung beider Anteile stattfinden. Die Tiefe muss normalerweise auf eine Frequenz,  $L_1$  oder  $L_2$ , abgestimmt werden. Durch eine spezielle Konstruktion mit elektronischen Filtern auf Grundlage der Microstrip-Technology wurden Choke Rings für zwei Frequenzen (*dual-depth dual-frequency*) entwickelt (*Filippov u. a. 1998*). Eine ähnliche Wirkung wie durch einen Choke Ring wird auch versucht, mit anderen - frequenzunabhängigen - Konstruktionen zu erreichen, da eine Choke Ring Konstruktion eine nicht unerhebliche Größe und Gewicht hat, die für Luftfahrtanwendungen oder handliche Rover-Ausrüstungen nicht geeignet ist. Ein Beispiel ist die Erzeugung einer Oberfläche mit hohem elektrischem Widerstand durch konzentrische Schlitz-Ringe (*Kunysz 2000b*). Es werden auch andere Möglichkeiten mit flachen Grundplatten getestet, u.a. eine sogenannte *dielectric cavity antenna* (*Bauregger u. a. 2001*) oder eine *resistivity tapered ground plane* (*Rama Rao u. a. 2000*). Bei letzterer Methode soll das schwächere Diffraktionssignal durch eine entsprechende Oberfläche mit einem sich zum Rand sehr stark erhöhendem Widerstand gedämpft werden. Dadurch wird eine extrem große Grundplatte simuliert. Oberflächenwellen von unterhalb der Grundplatte sollen nicht mehr zum Antennenelement gelangen. Ein ähnliches Verfahren wird bereits operationell in einem speziellen geodätischen Antennentyp genutzt (*Krantz u. a. 2001*).

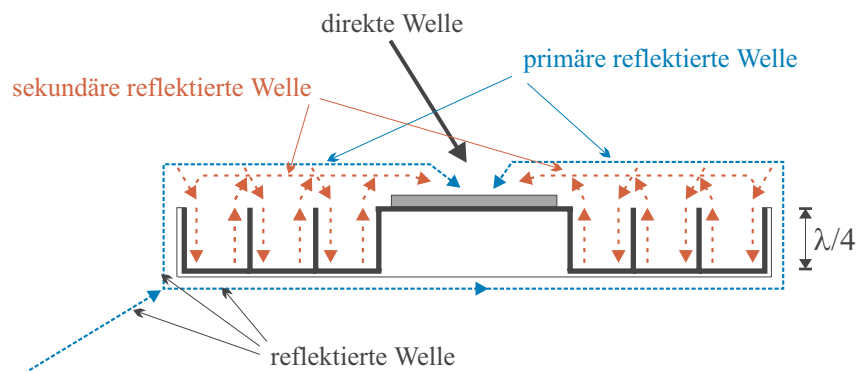


Abbildung 4.10: Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise eines Choke Rings (nach *Filippov u. a. 1998*). Auslöschung von primärer und sekundärer reflektierter Welle.

Zu den weiteren Antennencharakteristika gehört die Impedanz, typischerweise  $50 \Omega$ . Die komplizierte Abstimmung von Impedanz und Resonanzfrequenz (Abschnitt 4.2.2) hat viele Einflussfaktoren. Dazu zählt u.a. das Antennengehäuse und Radome (Dielektrizitätskonstante, Stärke), welche die Resonanzfrequenz verschieben können. Dieses wird herstellerseitig entsprechend berücksichtigt (*Langley 1998c*). Die Anpassung VSWR (Abschnitt 4.2.3) liegt bei GPS-Antennen in der Regel zwischen  $1.5 - 2.0 : 1$ . Die Bandbreite als Frequenzbereich, in dem die Anten-

ne entsprechend ihrer Spezifikationen gut arbeitet, ist meist schmal. Dies hat den Vorteil der Dämpfung potentieller Interferenzsignale von benachbarten Frequenzen. Einfrequenzantennen für C/A-Code-Empfänger sind normalerweise sehr schmalbandig in einem Bereich von ungefähr  $\pm 1-3(5)$  MHz. Etwas breitbandiger muss die Antenne gebaut werden, wenn mehr als nur die Zentralfrequenz des C/A-Code-Spektrums genutzt wird. Zweifrequenzantennen für Empfänger, die auch den P(Y)-Code nutzen, besitzen eine Bandbreite von ungefähr  $\pm 10$  MHz für jede Frequenz. Erste Antennenkonstruktionen zu Beginn der zivilen geodätischen Nutzung von GPS wie die des TI4100 (s.o.) wiesen durch ihre spezielle Konstruktion eine Bandbreite über den gesamten Bereich von  $L_2$  bis  $L_1$  auf. Antennen für den gleichzeitigen Empfang von GPS/GLONASS-Signalen sind noch breitbandiger konstruiert, mit einer Zentralfrequenz jeweils in der Mitte der beiden benachbarten Frequenzbänder, zum Beispiel  $1590 \pm 30$  MHz für  $L_1$  und  $1240 \pm 20$  MHz für  $L_2$  (*GPS World 2001*). Aktive Antennen unterscheiden sich auch durch ihren Vorverstärker. Dieser soll einen hohen Gewinn bei gleichzeitig geringem eigenen Rauschen aufweisen, da dieser Anteil das Gesamtrauschen des Systems dominieren kann. Der Gewinn liegt in der Regel zwischen 20 und 50 dB. Trotz der Schmalbandigkeit der Antenne selbst werden auch Filter gegen Interferenzsignale in den Vorverstärker integriert.

Nicht zuletzt charakterisiert das *phase pattern* die GPS-Antenne. Es wird ein stabiles Phasenzentrum gefordert, womit meist kleine Variationen und somit ein möglichst

- punktförmiges,
- richtungsunabhängiges

Phasenverhalten gemeint ist. Es sollte aber auch ein

- unveränderliches

Verhalten mit dieser Forderung verbunden sein. Weiterhin sollte die Forderung auch ein identisches Verhalten innerhalb gleicher Baureihen und sogar Bauserien betreffen. Ein punktförmiges *phase pattern* ist praktisch nicht erreichbar, speziell nicht für die Elevationsabhängigkeit. Für die horizontale Komponente ist ein fast punktförmiges Phasenzentrum theoretisch möglich, u.a. durch vier Speisepunkte für den Microstrip-Patch (z.B. *Krantz u.a. 2001*) oder auch durch andere Konstruktionsformen (z.B. *Kunysz 2000a*). Letztlich wird das PCV-Verhalten neben dem Empfangselement durch die gesamte Antennenkonstruktion beeinflusst, zum Beispiel auch durch einen Radom, was in dieser Arbeit näher untersucht wird.

Neue Entwicklungen im Design von präzisen geodätischen Antennen betreffen vor allem die Herstellung von möglichst kompakten und günstigen Antennen, die aber gleiche oder verbesserte Empfangseigenschaften aufweisen sollen.

#### 4.4.2 Beschreibung der Phasenzentrumsvariationen

Die Phasenzentrumsvariationen stellen eine direkte geometrische Einflussgröße - eine Veränderung der Phasen- und somit Streckenmessung - im GPS-Fehlerhaushalt dar (Kapitel 3.2). Die PCV-Charakteristik ist immer eine Funktion vom Gesamtaufbau der Antenne, also abhängig von der Elektronik (Art und Konstruktion von Empfangsteil etc.) und mechanischen Gegebenheiten (Material, Form und Größe von Gehäuse, Grundplatte, Radom). Zu ihrer Kalibrierung und späteren Korrektur erfolgt eine exakte Beschreibung dieser vom punktförmigen Empfang



(Abstrahlung) abweichenden richtungsabhängigen Variationen in Bezug zu einem definierten Punkt an der Antenne. Im Folgenden wird die Antenne nur noch als Empfangsantenne und ihr Strahlungsverhalten nur noch als Empfangsverhalten betrachtet, da der Hauptteil der später dargestellten Entwicklungen und Untersuchungen GPS-Empfangsantennen betrifft.

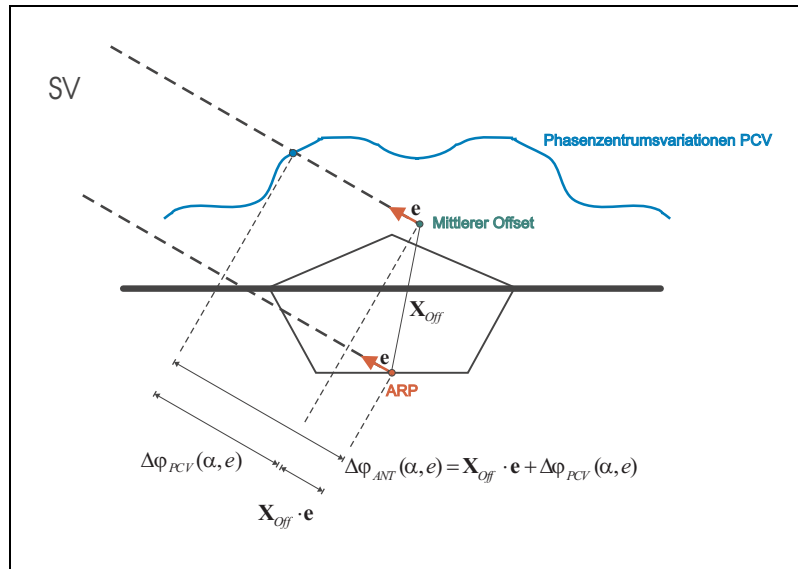


Abbildung 4.11: Beschreibung der Phasenzentrumsvariationen PCV. Beziehungen zwischen den Komponenten Antennenreferenzpunkt ARP, Mittlerer Offset  $\mathbf{X}_{Off}$  und den zugehörigen PCV  $\Delta\varphi_{PCV}(\alpha, e)$ .

Die Terminologie der Darstellungen folgt üblicher geodätischer Schreibweise. Dabei wird ausgehend von einer nach Norden (x-Achse) ausgerichteten Antenne ein topozentrisches System betrachtet (Linkssystem). In diesem Koordinatensystem wird die Satellitenrichtung über das Azimut  $\alpha$  (im Uhrzeigersinn Richtung y-Achse) und die Elevation  $e$  oder die Zenitrichtung  $z$  beschrieben.

Eine vollständige Beschreibung der Phasenzentrumsvariationen erfolgt über eine konsistente Einheit der drei jeweils aufeinander bezogenen Angaben (Abbildung 4.11)

- mechanisches Zentrum oder auch Antennenreferenzpunkt (*antenna reference point ARP*)
- mittleres elektrisches Phasenzentrum oder auch (mittlerer) Offset
- zugeordnete PCV.

Das mechanische Zentrum der Antenne ist ein definierter Bezugspunkt. Der ARP kann der Schnittpunkt von mechanischen Symmetrieachsen der Antenne sein, zum Beispiel von der Oberseite einer Grundplatte und der vertikalen Rotationsachse wie das Zentrum des Gewindes. Die Beschreibung der PCV erfolgt bezüglich dieses festgelegten Punktes, der den Ursprung des Koordinatensystems der Antenne bildet.

Das mittlere elektrische Phasenzentrum ist die Approximierung des tatsächlichen Empfangsverhaltens - der realen Phasenfront - durch eine Kugeloberfläche. Der Kugelmittelpunkt repräsentiert dieses Zentrum. Der Vektor vom ARP zum Kugelmittelpunkt ist der (mittlere) Offset.

Für den Idealfall einer Antenne, beispielsweise für einen praktisch nicht realisierbaren isotropen Kugelstrahler mit kugelförmiger Strahlungscharakteristik gleichmäßig in alle Richtungen, beschreibt dieser Ort allein bereits das Empfangsverhalten korrekt. In diesem Fall wären die PCV nicht mehr richtungsabhängig. Auf Grund der vielfältigen Einflüsse von Konstruktionsmerkmalen (Abschnitte 4.2.2, 4.2.3 und 4.4.1) ist es unmöglich, eine derartige Antenne zu bauen. Das Empfangsverhalten unterscheidet sich mehr oder weniger stark vom Idealverhalten. Somit kann der Offset nur als Annäherung an die tatsächlichen richtungsabhängigen Variationen dienen. Je nach Art der Bestimmung sind zudem noch Unterschiede in den Ergebnissen zu erwarten. Diese Offset-Problematik wird detaillierter in Abschnitt 5.1 behandelt.

Die von der Frequenz  $f$  abhängigen Phasenzentrumsvariationen sind Ausdruck der Variabilität des Phasenzentrums. Sie sollen hier die Veränderungen der Phasenlage in Abhängigkeit von der Signalrichtung beschreiben. Diese PCV repräsentieren die verbleibenden Abweichungen der Phasenfront von der bereits durch den mittleren Offset aufgenommenen kugelförmigen Charakteristik. Sie beschreiben somit eine Phasenverzögerung (*phase delay*) oder -beschleunigung bezüglich der idealen Phasenfront eines - tatsächlich nicht existierenden - Punktstrahlers. Es handelt sich allgemein um die **Phasenvariationen PV** (*phase pattern*), bezeichnet auch als APV (*DIN/NABau 2003*). Die Klarstellung (Abbildung 4.12) muss an dieser Stelle nochmals speziell betont werden, da es Missverständnisse mit dem Gebrauch der Bezeichnung Phasenzentrumsvariation im elektrotechnischen Bereich geben kann (*Tatarnikov 2001*). Im Gegensatz zu der hier gemeinten Variation der Phasenfront und deren Differenz zu einer Kugelform wird dort üblicherweise das wirkliche Zentrum rekonstruiert (*Tranquilla 1986*). Die Wellenfront kann dabei durch differentiell kleine Kugeloberflächenabschnitte repräsentiert werden. Jedes Segment besitzt ein korrespondierendes Phasenzentrum. Dieses variierende scheinbare Phasenzentrum (*apparent phase center*) wird aus praktischen Gründen (Kalibrierung, Korrektion) nicht direkt genutzt, sondern die beschriebene Phasenvariation PV (z.B. *Bartels 1995*). Es wird der richtungsabhängige Distanzfehler der Antenne und nicht die Bewegung des Ortes des Phasenzentrums bestimmt.

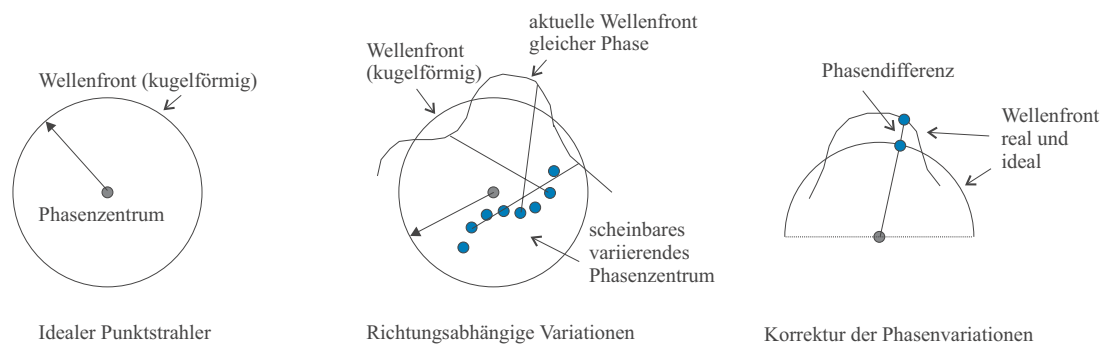


Abbildung 4.12: Phasenzentrumsvariationen und Phasenvariationen. Ideale und reale Wellenfront gleicher Phase. Praktische Umsetzung eines Korrekturmodells über Phasenvariationen als Differenz zwischen Kugeloberfläche bezüglich Offset bzw. Referenzpunkt und tatsächlicher Phasenfront (Abbildung 4.11).

Die PCV-Werte werden immer eindeutig einem Bezugspunkt zugeordnet, dem Offset oder dem ARP. Sie können streng auf unterschiedliche Bezugspunkte umgerechnet werden. Auf diese Weise beschreiben verschiedene Einheiten aus Offset bzw. Bezugspunkt und zugeordneten PCV das gleiche Empfangsverhalten. Die Beschreibung und Umrechnung der richtungsabhängigen PCV  $\Delta\varphi_{ANT_f}(\alpha, e)$ , hier dargestellt als Änderung der Phasenbeobachtung, erfolgt mit

$$\begin{aligned}
\Delta\varphi_{ANT_f}(\alpha, e) &= \mathbf{X}_{Off_{f,1}} \cdot \mathbf{e}_{sv_i}(\alpha, e) + \Delta\varphi_{PCV_{f,1}}(\alpha, e) \\
&= \mathbf{X}_{Off_{f,2}} \cdot \mathbf{e}_{sv_i}(\alpha, e) + \Delta\varphi_{PCV_{f,2}}(\alpha, e) \\
&= \dots
\end{aligned} \tag{4.44}$$

Die Indizes 1 und 2 geben an dieser Stelle die verschiedenen Möglichkeiten für Offset-PCV-Kombinationen an. Die Summe aus Offset-Korrektur, der Projektion des Offset-Vektors  $\mathbf{X}_{Off_f}$  auf den Einheitsvektor  $\mathbf{e}$  in Richtung eines bestimmten Satelliten  $sv_i$ , und den verbleibenden Variationen  $\Delta\varphi_{PCV_f}(\alpha, e)$  bilden die gesuchte Korrektur. Die Nord-, Ost- und Höhenkomponenten des Einheitsvektors als Funktion der Satellitenrichtung, Azimut  $\alpha$  und Elevation  $e$  bzw. Zenitrichtung  $z$ , ergeben sich im oben beschriebenen topozentrischen System zu

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}_x &= \mathbf{e}_{Nord} = \cos \alpha \cdot \sin z = \cos \alpha \cdot \cos e \\
\mathbf{e}_y &= \mathbf{e}_{Ost} = \sin \alpha \cdot \sin z = \sin \alpha \cdot \cos e \\
\mathbf{e}_z &= \mathbf{e}_{Höhe} = \cos z = \sin e.
\end{aligned} \tag{4.45}$$

Mit (4.44) können PCV auf einen beliebigen Offset bzw. Referenzpunkt umgerechnet werden. Dies kann u.a. erforderlich sein, um Ergebnisse unterschiedlicher Kalibrierungen miteinander vergleichen zu können. Durch Gleichsetzung ergibt sich

$$\mathbf{X}_{Off_{f,1}} \cdot \mathbf{e}_{sv_i}(\alpha, e) + \Delta\varphi_{PCV_{f,1}}(\alpha, e) = \mathbf{X}_{Off_{f,2}} \cdot \mathbf{e}_{sv_i}(\alpha, e) + \Delta\varphi_{PCV_{f,2}}(\alpha, e). \tag{4.46}$$

Die zum neuen Offset  $\mathbf{X}_{Off_{f,2}}$  zugeordneten PCV  $\Delta\varphi_{PCV_{f,2}}(\alpha, e)$  berechnen sich zu

$$\begin{aligned}
\Delta\varphi_{PCV_{f,2}}(\alpha, e) &= \mathbf{X}_{Off_{f,1}} \cdot \mathbf{e}_{sv_i}(\alpha, e) - \mathbf{X}_{Off_{f,2}} \cdot \mathbf{e}_{sv_i}(\alpha, e) + \Delta\varphi_{PCV_{f,1}}(\alpha, e) \\
&= \Delta\varphi_{PCV_{f,1}}(\alpha, e) - (\mathbf{X}_{Off_{f,2}} - \mathbf{X}_{Off_{f,1}}) \cdot \mathbf{e}_{sv_i}(\alpha, e) \\
&= \Delta\varphi_{PCV_{f,1}}(\alpha, e) - \Delta\mathbf{X}_{Off_f} \cdot \mathbf{e}_{sv_i}(\alpha, e).
\end{aligned} \tag{4.47}$$

Durch Einsetzen des Einheitsvektors  $\mathbf{e}$  ergibt sich

$$\Delta\varphi_{PCV_{f,2}}(\alpha, e) = \Delta\varphi_{PCV_{f,1}}(\alpha, e) - \begin{vmatrix} \Delta x_{Off_f} \\ \Delta y_{Off_f} \\ \Delta z_{Off_f} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \alpha \cdot \cos e \\ \sin \alpha \cdot \cos e \\ \sin e \end{vmatrix}. \tag{4.48}$$

Wird nur eine Änderung des Höhenoffsets vorgenommen, vereinfacht sich (4.48) zu

$$\begin{aligned}
\Delta\varphi_{PCV_{f,2}}(\alpha, e) &= \Delta\varphi_{PCV_{f,1}}(\alpha, e) - \Delta z_{Off_f} \cdot \sin e \\
&= \Delta\varphi_{PCV_{f,1}}(\alpha, e) - \Delta h_f \cdot \sin e.
\end{aligned} \tag{4.49}$$

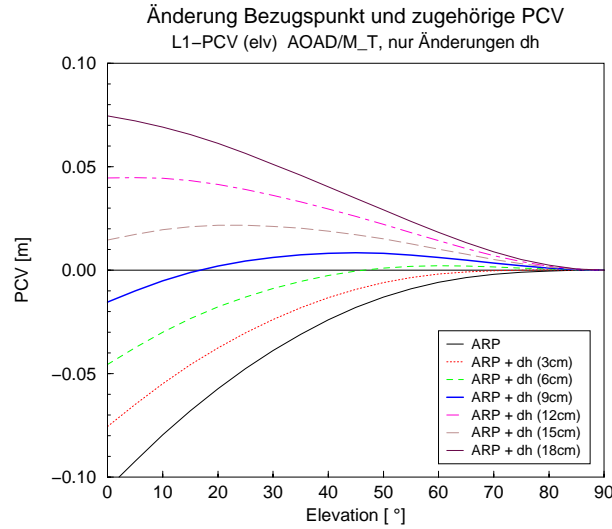


Abbildung 4.13: Wahl des Bezugspunktes und zugehörige PCV. Beispiel AOAD/M\_T, L1-Signal, nur Veränderungen des Höhenbezugs.

Ein Beispiel für auf unterschiedliche Höhenoffsets bezogene PCV mit identischer Korrekturwirkung wird in Abbildung 4.13 dargestellt. Gezeigt werden rein elevationsabhängige L1-PCV der AOAD/M\_T-Antenne mit Bezug auf einen veränderten Höhenreferenzpunkt.

Für eine direkte Vergleichbarkeit von zwei PCV-Ergebnissen (Abschnitt 6) sollte nach der Umrechnung auf einen gemeinsamen Offset evt. noch ein unterschiedlicher Zenitwert

$$\Delta z = \Delta\varphi_{PCV_{f,2}}(e=90^\circ) - \Delta\varphi_{PCV_{f,1}}(e=90^\circ) \quad (4.50)$$

zwischen beiden berücksichtigt werden. Je nach Art der Modellbildung einer Kalibrierung sind die PCV-Korrekturen im Zenit Null oder von Null verschieden. Es bietet sich für einen Vergleich zum Beispiel an, die PCV im Zenit einheitlich zu Null zu setzen. Dazu wird  $\Delta z$  additiv an alle Werte gleichartig angebracht. Dies ist ohne weiteres zulässig, da sich ein einheitlicher Korrekturwert für alle PCV-Werte wie ein Uhrfehler auswirkt, der entweder bestimmt oder eliminiert wird. Es ergibt sich eine allgemeine Formel zur Umrechnung von PCV auf einen neuen Bezugspunkt bei gleichzeitiger Vereinheitlichung der Zenitbedingung zu

$$\Delta\varphi_{PCV_{f,2}}(\alpha, e) = \Delta\varphi_{PCV_{f,1}}(\alpha, e) - \Delta\mathbf{X}_{Off_f} \cdot \mathbf{e}_{sv_i}(\alpha, e) + \Delta z. \quad (4.51)$$

Die PCV von GPS-Antennen werden in Abänderung des dargestellten kompletten Modells teilweise nur als Funktion der Elevation  $e$  beschrieben. Dies ist zum einen gerechtfertigt durch die für bestimmte Antennen dominierende Abhängigkeit der PCV von Änderungen in der Elevationsrichtung. Andererseits ist es u.U. bedingt durch ein geringeres Auflösungsvermögen bestimmter Kalibrierungsverfahren (vgl. Kapitel 5). Bei nur durch elevationsabhängige PCV beschriebenen Kalibrierungsergebnissen ergibt sich ein Sonderfall bei der Umrechnung auf einen anderen Bezugspunkt. Die Lage-Offsets von Antennen - Nord- und Ostkomponente - repräsentieren azimutale PCV (Abbildung 4.14). Eine Umrechnung bzw. Veränderung dieser Komponenten würde

somit azimutale PCV erzeugen, die aber rein technisch gesehen nicht durch die elevationsabhängigen PCV aufgenommen werden können. Liegen nur derartige Ergebnisse vor, kann bei Transformationen auf einen einheitlichen Bezugspunkt zu Vergleichszwecken nur die Höhenkomponente verändert werden (Abschnitte 6.3 und 6.4). Eine andere Möglichkeit ist die Expansion der rein elevationsabhängigen PCV in ein komplettes Modell und anschließende Transformation aller Offset-Komponenten.

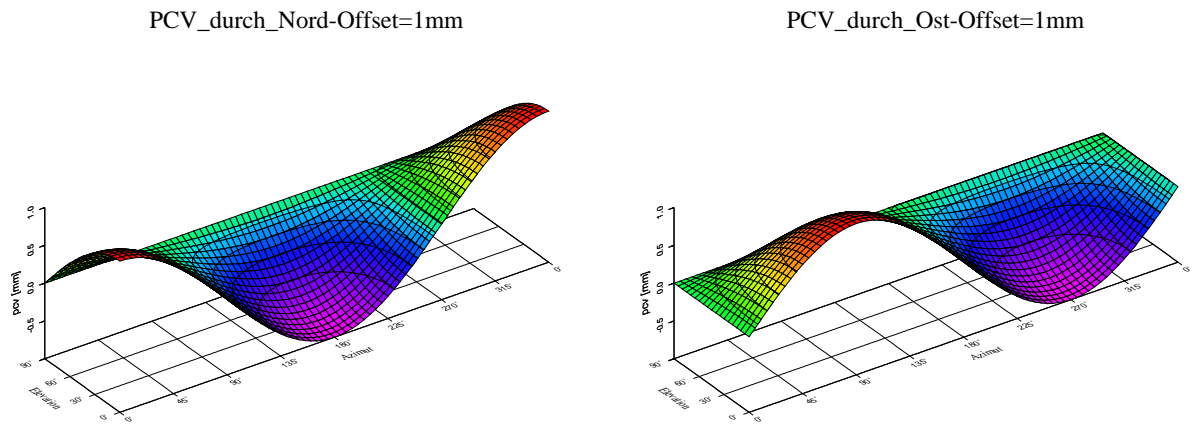


Abbildung 4.14: Beispiele für durch Lage-Offsets beschriebene PCV. Veränderung nur der Nordkomponente um  $1\text{ mm}$  (links) und nur der Ostkomponente um  $1\text{ mm}$  (rechts).

Neben der Richtungsabhängigkeit der PCV muss für ihre exakte Beschreibung auch die Frequenzabhängigkeit betrachtet werden. Bei der Bildung von Linearkombinationen aus L1 und L2 entstehen die PCV für die jeweiligen Signale auf gleiche Art und Weise. Somit entstehen von den beiden Trägersignalen unterschiedliche PCV in den Signalen der vielfach möglichen Linearkombinationen. Dies ist besonders interessant für das in größeren Netzen genutzte ionosphärenfreie Signal  $L_0$  (Kapitel 3), durch dessen Bildung (*UNAVCO 1995*)

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{ANT_{L_0}}(\alpha, e) &= \left( \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \cdot \Delta\varphi_{ANT_{L_1}}(\alpha, e) - \left( \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \cdot \Delta\varphi_{ANT_{L_2}}(\alpha, e) \\ &= 2.5457 \cdot \Delta\varphi_{ANT_{L_1}}(\alpha, e) - 1.5457 \cdot \Delta\varphi_{ANT_{L_2}}(\alpha, e) \end{aligned} \quad (4.52)$$

sich auch eine Verstärkung der PCV der beiden Grundsignale ergibt.

## 4.5 Anforderungen für hochpräzise Messungen

Wie bereits in den Vorabschnitten beschrieben (Abschnitt 4.4.1), werden für präzise Messungen hohe Anforderungen an das Empfangsverhalten der Antennen gestellt. Die sich zum Teil widersprechenden Vorgaben für einen guten Empfang der GPS-Signale, zum Beispiel möglichst rauscharme Signale über die gesamte Hemisphäre bis zum Horizont bei gleichzeitiger Vermeidung von Multipath-Signalen, werden immer nur als Kompromisslösung bei der Antennenkonstruktion erfüllt werden können. Neben den Anforderungen an die elektronische Konstruktion ergeben sich selbstverständlich auch Anforderungen an die Korrektur für die vorhandenen PCV. Denn eine Antenne mit großen Variationen in ihrem *phase pattern* kann - bei entsprechender Güte einer

Kalibrierung - genauso gut für hochgenaue Anwendungen eingesetzt werden, solange dieses Verhalten unveränderlich ist. Zumindest muss die Anforderung an diese Stabilität auf dem gleichen oder besser auf einem eine Größenordnung geringeren Niveau im Vergleich mit der Kalibrier-genauigkeit liegen. Die Forderung eines guten und stabilen Empfangsverhalten suggeriert meist nur die Vorstellung kleiner Phasenvariationen, meint aber vor allem die Unveränderlichkeit dieser Werte, zum Beispiel trotz Alterung und verschiedenen Temperaturen.

Aus diesem Grund muss konsequenterweise die Genauigkeit der Kalibrierungsergebnisse von PCV detaillierter betrachtet werden, wenn für hochpräzise Messungen bestimmte Genauigkeitsgrenzen erreicht werden sollen. Es handelt sich also um die Beschreibung des Einflusses zufälliger Fehler - der Güte der kalibrierten PCV - unter der Voraussetzung der Notwendigkeit zur Berücksichtigung dieser Korrekturen. Die Auswirkung der systematisch wirkenden Fehlerquelle PCV selbst, Unterschiede zwischen Korrektur und Nicht-Korrektur bzw. Korrekturen verschiedener Kalibrierungsverfahren, werden an späterer Stelle dargestellt (Kapitel 8). Die verschiedenen Methoden der Kalibrierung und ihre Genauigkeiten werden im nächsten Kapitel 5 beschrieben. In diesem Abschnitt soll bereits, unter Vorwegnahme von Ergebnissen einzelner Kalibrierungsverfahren, eine Fehlerabschätzung durch PCV gemacht werden, um die Anforderungen an Antennen für hochgenaue GPS-Anwendungen umfassender darzustellen.

Aus den Anforderungen an die Genauigkeit der Positionsbestimmung ergeben sich die Genauigkeitsanforderungen für die Kalibrierung der einzuführenden PCV (*Wübbena u.a. 2001b*). Die Genauigkeit der Positionsbestimmung  $s_{Pos}$  (mittlerer Positionsfehler, RMS) für eine einzelne Messepoche eines Signals mit der Frequenz  $f$  ( $L_1$ ,  $L_2$ , Linearkombinationen), somit in Approximation auch gültig für RTK-Messungen oder Kurzzeitbeobachtungen, ist gegeben durch (z.B. *Parkinson 1996, Seeber 1993*)

$$s_{Pos} = PDOP \cdot s_{Phase_f}. \quad (4.53)$$

Die Messgenauigkeit der reinen Rohphasenmessung  $s_{Phase_{L_1,L_2}}$  liegt für moderne GPS-Empfänger im mm- bzw. sub-mm-Bereich. An dieser Stelle soll unter Vernachlässigung anderer Fehlerquellen allein der Fehler durch die PCV betrachtet werden. Für  $s_{Phase_f}$  ist in diesem Fall die Standardabweichung  $s_{\Delta\varphi_{ANT_f}}$  der PCV nach (4.44) anzusetzen. Bei Nutzung des  $L_0$ -Signals muss die entsprechende Standardabweichung der PCV durch Fehlerfortpflanzung von (4.52) bestimmt werden. Es ergibt sich

$$s_{\Delta\varphi_{ANT_{L_0}}}^2 = 2.5457^2 \cdot s_{\Delta\varphi_{ANT_{L_1}}}^2 + 1.5457^2 \cdot s_{\Delta\varphi_{ANT_{L_2}}}^2. \quad (4.54)$$

Unter Annahme von unkorrelierten und gleichen Fehlereinflüssen auf die  $L_1$ - und  $L_2$ -PCV folgt mit  $s_{\Delta\varphi_{ANT_{L_1=L_2=L}}}$

$$s_{\Delta\varphi_{ANT_{L_0}}} = 2.9782 \cdot s_{\Delta\varphi_{ANT_L}} \approx 3 \cdot s_{\Delta\varphi_{ANT_L}}. \quad (4.55)$$

Werden die PCV in einem Kalibrierungsverfahren direkt und in einem Schritt bestimmt (Absolute Feldkalibrierung, Abschnitt 5.4), kann ihr Einfluss auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung mit  $s_{\Delta\varphi_{ANT_f}} = s_{\Delta\varphi_{PCV_f}}$  direkt abgeschätzt werden:

$$s_{Pos_I} = PDOP \cdot s_{\Delta\varphi_{ANT_f}}. \quad (4.56)$$

Bei anderen Verfahren wie der relativen Feldkalibrierung (Abschnitt 5.2) werden die PCV in zwei getrennten Schritten berechnet. Die Offset-Bestimmung erfolgt zuerst. Anschließend werden die sich auf diesen Wert beziehenden PCV bestimmt. Eine Genauigkeitsabschätzung für diesen Fall kann äquivalent zu (4.53) und (4.56) durchgeführt werden. Allerdings können jetzt nicht mehr  $s_{\Delta\varphi_{ANT_f}}$  und  $s_{\Delta\varphi_{PCV_f}}$  gleichgesetzt werden. Der PDOP-Faktor überträgt die Fehler aus dem Beobachtungsraum (Streckenmessung) in die Koordinatenebene. Dies gilt für die PCV. Ein Offset hingegen wirkt unabhängig von der Satellitenkonstellation auf die Position, somit geht auch sein Fehler direkt in einen Positionsfehler über. Dies kann leicht am Beispiel eines einfachen Ausgleichungsmodells für gleichgenaue und unkorrelierte GPS-Beobachtungen nachgewiesen werden (*Geiger 1988*). Dort wird der Einfluss der Distanzfehler unter Nutzung von (4.44) auf die Unbekannten aufgezeigt. Es wird deutlich, dass der antennenfeste Anteil von  $\Delta\varphi_{ANT_f}(\alpha, e)$ , der Offset  $\mathbf{X}_{Off_f}$ , völlig unabhängig von der Konstellation in den Positionsfehler eingeht. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung für diesen Fall ergibt sich wiederum aus (4.53) und in Erweiterung von (4.56) zu

$$s_{Pos_{II}}^2 = s_{\mathbf{X}_{Off_f}}^2 + PDOP^2 \cdot s_{\Delta\varphi_{PCV_f}}^2. \quad (4.57)$$

Eine quantitative Abschätzung der erreichbaren Positionsgenauigkeit für verschiedene Beispiele mit (4.56) und (4.57) wird in Tabelle 4.3 dargestellt. Dabei wird neben der Positionsgenauigkeit einer Station (Referenzstation) auch die entsprechende Angabe für eine zweite Station (Rover-Station) gemacht. Die Genauigkeit für eine Basislinienmessung bzw. Nutzung von Korrekturdaten innerhalb eines Referenznetzes ergibt über Fehlerfortpflanzung einen um Faktor  $\sqrt{2}$  verschlechterten Wert. Eine Verminderung der Positionsgenauigkeit ergibt sich durch einen höheren PDOP-Wert, dessen mittlere Werte normalerweise zwischen 1 und 3 liegen. Aber bereits Werte zwischen 1 und 3 können eine - für hochpräzise Anwendungen - erhebliche Genauigkeitsdifferenz in den Positionslösungen bewirken. Eine weitere Verschlechterung ergibt sich für die Nutzung des ionosphärenfreien Signals  $L_0$  (4.55).

Das Beispiel in Abbildung 4.15 verdeutlicht die Notwendigkeit für eine hochgenaue Kalibrierung der genutzten Antennen. Dies gilt besonders für Referenzstationsnetze, in denen der Netzbetreiber für verschiedene potentielle Nutzer die höchstmögliche Genauigkeit zur Verfügung stellen muss. Betrachtet man eine  $L_0$ -Lösung für Referenz- und Roverstation, so ergibt sich für Kurzzeitmessungen die hohe Anforderung nur an die Genauigkeit der PCV von mindestens 1 mm, um eine Positionsgenauigkeit auf dem Niveau von 1 cm zu erreichen. Dabei werden alle anderen Fehlerquellen nicht betrachtet. Dieses hohe Genauigkeitsniveau ist nicht mit einfachen Kalibrierungs- bzw. Prüfmethode zu erreichen.

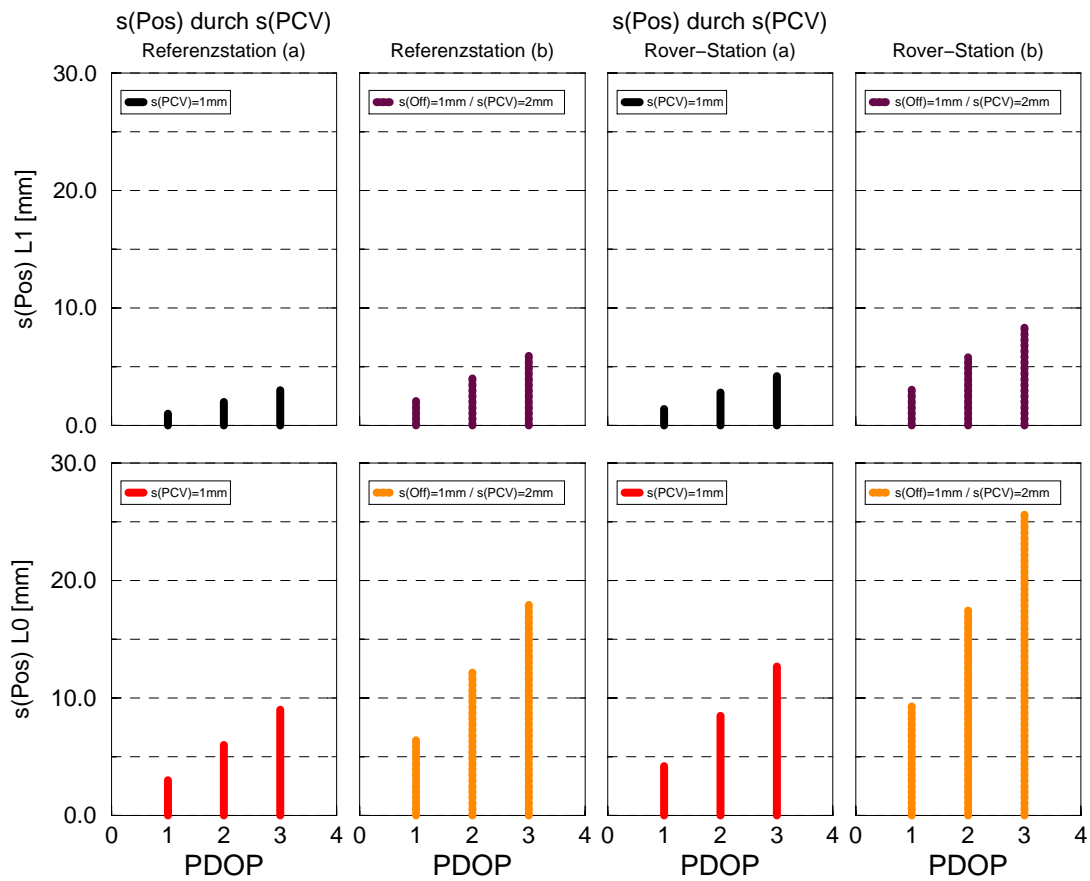


Abbildung 4.15: Abschätzung der Genauigkeit der Positionsbestimmung einer einzelnen Mess-epoche auf Grund der Genauigkeit der eingeführten PCV-Korrekturen. Die Genauigkeiten der eingeführten PCV beziehen sich auf die Originalsignale. Dargestellt werden die Positionsgenauigkeiten für eine  $L_1$ - und eine  $L_0$ -Lösung, jeweils für Referenz- und Rover-Station (vgl. Tabelle 4.3).



Tabelle 4.3: Abschätzung der Genauigkeit der Positionsbestimmung einer einzelnen Messepoche auf Grund der Genauigkeit der eingeführten PCV-Korrekturen. Annahme mittlerer PDOP-Faktoren zwischen 1 und 3. Beispiele für das  $L_1$ -Signal und das ionosphärenfreie Signal  $L_0$ . Angabe der Genauigkeit für Referenz- und Rover-Station.

<b>L<sub>1</sub>-Lsg.</b> PDOP	$s_{\mathbf{x}_{OffL}}$ [mm]	$s_{\Delta\varphi_{PCVL}}$ [mm]	$s_{PosRef}$ [mm]	$s_{PosRov}$ [mm]
1	-	1	1.0	1.4
2	-	1	2.0	2.8
3	-	1	3.0	4.2
1	-	2	2.0	2.8
2	-	2	4.0	5.7
3	-	2	6.0	8.5
1	1	1	1.4	2.0
2	1	1	2.2	3.1
3	1	1	3.2	4.5
1	1	2	2.2	3.2
2	1	2	4.1	5.8
3	1	2	6.1	8.6
1	2	1	2.2	3.1
2	2	1	2.8	4.0
3	2	1	3.6	5.1
1	2	2	2.8	4.0
2	2	2	4.5	6.3
3	2	2	6.3	8.9
<b>L<sub>0</sub>-Lsg.</b> PDOP	$s_{\mathbf{x}_{OffL}}$ [mm]	$s_{\Delta\varphi_{PCVL}}$ [mm]	$s_{PosRef}$ [mm]	$s_{PosRov}$ [mm]
1	-	1	3.0	4.2
2	-	1	6.0	8.5
3	-	1	9.0	12.7
1	-	2	6.0	8.5
2	-	2	12.0	17.0
3	-	2	18.0	25.5
1	1	1	4.2	6.0
2	1	1	6.7	9.5
3	1	1	9.5	13.4
1	1	2	6.7	9.5
2	1	2	12.4	17.5
3	1	2	18.2	25.8
1	2	1	6.7	9.5
2	2	1	8.5	12.0
3	2	1	10.8	15.3
1	2	2	8.5	12.0
2	2	2	13.4	19.7
3	2	2	19.0	26.8

## Kapitel 5

# Kalibrierung von GPS-Antennen

Bereits seit Beginn der achtziger Jahre wurde die Problematik des nicht-punktförmigen Antennenempfangsverhaltens und seine Bedeutung für die präzise Positionsbestimmung erkannt (z.B. *Sims 1985, Geiger 1988, Tranquilla und Colpitts 1989*). Erste Ergebnisse aus Kammerkalibrierungen und theoretische Untersuchungen erbrachten dabei grundlegende Erkenntnisse über das Empfangsverhalten von GPS-Antennen und mögliche Auswirkungen auf die Positionsbestimmung. Genauere und operationelle Verfahren haben sich erst in den neunziger Jahren entwickelt. Auf Grund stark verbesserter Genauigkeiten und der Vielzahl von gemeinsam eingesetzten unterschiedlichen Antennentypen war der Bedarf für neue Kalibrierungsmöglichkeiten plötzlich vorhanden. Die Notwendigkeit der Korrektur der PCV besonders in hochpräzisen Anwendungen wurde erkannt.

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über verschiedene Arten der GPS-Antennenkalibrierung gegeben. Die Möglichkeiten (Methoden, Genauigkeitsniveaus etc.) sind vielfältig. Man kann die unterschiedlichen Kalibrierungen in mehrere Gruppen aufteilen, wobei innerhalb dieser Gruppen noch Differenzen in der jeweiligen Umsetzung vorhanden sein können:

- Antennenprüfung bzw. reine Offsetbestimmung
- Relative Feldkalibrierung
- Absolute Kammerkalibrierung
- Absolute Feldkalibrierung
- (Stationskalibrierung)

Die Stationskalibrierung wird in diesem Kapitel nicht näher behandelt. Es handelt sich dabei um die Bestimmung der Antennen-PCV und weiterer Effekte (Multipath, Diffraktion, Umgebung) auf einer Station. Aktueller Stand und ein Ausblick auf neue Entwicklungen werden in Abschnitt 3.2.2 aufgezeigt.

In diesem und folgenden Kapiteln bildet das entwickelte Verfahren der Absoluten Feldkalibrierung (Entwicklungen, Methodik, Genauigkeiten etc.) den Schwerpunkt. Dessen hochgenauen Ergebnisse bilden die Grundlage für Vergleiche mit anderen Verfahren, Untersuchungen verschiedener Antennen und die Auswirkung von PCV in verschiedenen Anwendungen.

## 5.1 Antennenprüfung - Reine Offsetbestimmung

Wie bereits in Abschnitt 4.4.2 dargestellt, repräsentiert der Offset ein mittleres Phasenzentrum der Antenne, abweichend von einem definierten mechanischen Referenzpunkt. Bei der Bestimmung sind Unterschiede durch das jeweilige Verfahren einerseits und durch verschiedene Einflussfaktoren andererseits zu erwarten. Dabei ist die Bestimmung eines Höhen-Offsets als Funktion der elevationsabhängigen PCV am kritischsten. Begründet ist dies vor allem darin, dass nur Beobachtungen der oberen Hemisphäre, also über eine  $180^\circ$  Halbkugel vorhanden sind. Das absolute Maß ist zudem in Beziehung eines willkürlich festgelegten vertikalen Referenzpunktes zu sehen. Die Horizontal-Offsets als Funktion der azimutalen PCV lassen sich zuverlässig mit einfachen Verfahren bestimmen. Sie sind meist - als Konstruktionsziel - klein und liegen je nach Antenne (Typ, Fertigung etc.) nahe der Rotationsachse.

Je nach eingesetztem Prüf- bzw. Kalibrierungsverfahren finden sich grundsätzlich unterschiedliche Vektorangaben (Nord, Ost, Höhe) für die Antennen-Offsets:

- relative Offsets bezüglich Referenzantenne (3D)
- absolute Lage-Offsets (2D) + relativer Höhen-Offset
- absolute Offsets (3D).

Vergleiche können nicht zwischen verschiedenartigen Angaben gezogen werden. Speziell ein relativer Höhen-Offset bezüglich irgendeiner definierten Referenzantenne ist gänzlich verschieden von einem absoluten Offset. Derartige Vergleiche und Mischungen kommen in praktischen Arbeiten auf Grund fehlender Informationen leider häufig vor.

Drei grundlegende Vorgehensweisen für eine Antennenprüfung sind denkbar. Diese Verfahren sollten dabei mit gleichem Aufbau, gleicher Umgebung, gleicher Auswertestrategie etc. durchgeführt werden. Auf diese Weise können Antennen auf Veränderungen kontrolliert werden, ohne dass die später beschriebenen Einflussfaktoren eine Auswirkung auf die Bestimmung haben. Die drei Methoden sind:

- bekannte Basislinie (Eichbasis)
- Antennenrotation
- Antennentausch (*Antenna Swap*).

Sie werden separat als Prüfmethode für eine reine Offsetbestimmung eingesetzt. Gleichzeitig bilden sie die grundlegenden Methoden für die PCV-Kalibrierung, wie zum Beispiel die Eichbasis in Verbindung mit ggf. einzelnen horizontalen Rotationen in Relativverfahren (Abschnitt 5.2) sowie Rotationen und Kippungen im Absoluten Feldverfahren (Abschnitt 5.4). Die Erläuterungen erfolgen vorerst ohne Betrachtung der PCV, sondern unter der Annahme eines die Antenne repräsentierenden mittleren Offsets. Dies ist für Langzeitbeobachtungen unter bestimmten Bedingungen (Konstellation, Wahl der Elevationsmaske etc.) durchaus vertretbar. Die Betrachtungen basieren auf Koordinatenebene. Die Bildung von Koordinatendifferenzen ergibt die Offsets. Die Bestimmung von PCV beruht auf Modellen im Beobachtungsraum.

Für das Verfahren mit bekannter Basis (Abbildung 5.1) wird die Basislinie  $\Delta \mathbf{x}_{Ist}$  vorab hochpräzise bestimmt. Dazu werden teilweise identische Antennen und lange und wiederholte GPS-Messungen genutzt. Vor allem werden aber terrestrische Methoden wie das Feinnivellement für die Höhenunterschiede angewandt. Die Sollkoordinaten werden anschließend mit dem Ergebnis der GPS-Auswertung  $\Delta \mathbf{x}_{Soll}$  verglichen. Es gilt:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{Off_R} + \Delta \mathbf{x}_{Ist} &= \Delta \mathbf{x}_{Soll} + \mathbf{X}_{Off_P} \\ \mathbf{X}_{Off_P} - \mathbf{X}_{Off_R} &= \Delta \mathbf{x}_{Ist} - \Delta \mathbf{x}_{Soll} \\ \Delta \mathbf{X}_{Off_{(P-R)}} &= \Delta \mathbf{x}_{Ist} - \Delta \mathbf{x}_{Soll}. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Die Differenz zwischen dem Offset des Prüflings  $\mathbf{X}_{Off_P}$  und dem der Referenzantenne  $\mathbf{X}_{Off_R}$  entspricht der Differenz zwischen Messung und der Sollbasislinie. Man erhält einen relativen 3D-Offset (Nord, Ost, Höhe) in Abhängigkeit der verwendeten Referenzantenne.

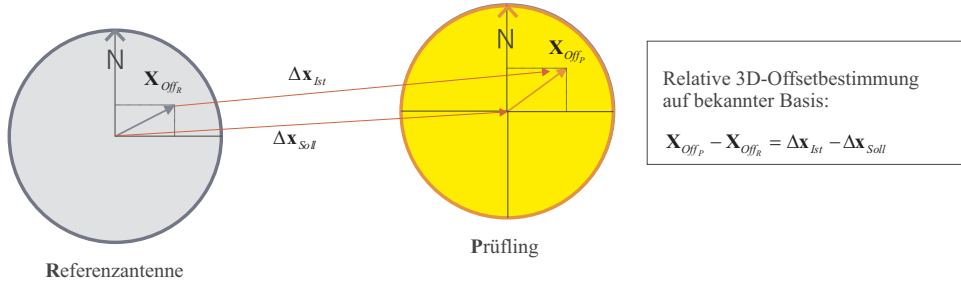


Abbildung 5.1: Offsetbestimmung auf bekannter Basis. Aus der Differenz zwischen  $\Delta \mathbf{x}_{Ist}$  und  $\Delta \mathbf{x}_{Soll}$  der Basislinie wird der relative 3D-Offset abgeleitet.

Bei der Vorgehensweise Antennentausch (Abbildung 5.2) ist das Ergebnis ebenfalls ein relativer 3D-Offset. Durch das Umsetzen der Antennen auf den jeweiligen anderen Endpunkt der Basislinie erübrigt sich die Kenntnis einer Eichbasis.

$$\begin{aligned} (\mathbf{X}_{Off_P} - \mathbf{X}_{Off_R}) + \Delta \mathbf{x}_{Swap} &= \Delta \mathbf{x}_{Ist} - (\mathbf{X}_{Off_P} - \mathbf{X}_{Off_R}) \\ 2 \cdot (\mathbf{X}_{Off_P} - \mathbf{X}_{Off_R}) &= \Delta \mathbf{x}_{Ist} - \Delta \mathbf{x}_{Swap} \\ \Delta \mathbf{X}_{Off_{(P-R)}} &= \frac{1}{2} \cdot (\Delta \mathbf{x}_{Ist} - \Delta \mathbf{x}_{Swap}). \end{aligned} \quad (5.2)$$

Das horizontale Rotieren des Antennenprüflings (Abbildung 5.3) erlaubt die Bestimmung eines absoluten Lage-Offsets. Für die Höhenkomponente kann weiterhin nur ein relativer Wert abgeleitet werden. Im einfachsten Fall werden Beobachtungen in Nord- und in Südausrichtung ausgeführt.

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}_{Ist} - \mathbf{X}_{Off_P} &= \Delta \mathbf{x}_{Rot} + \mathbf{X}_{Off_P} \\ 2 \cdot \mathbf{X}_{Off_P} &= \Delta \mathbf{x}_{Ist} - \Delta \mathbf{x}_{Rot} \\ \Delta \mathbf{X}_{Off_P} &= \frac{1}{2} \cdot (\Delta \mathbf{x}_{Ist} - \Delta \mathbf{x}_{Rot}). \end{aligned} \quad (5.3)$$

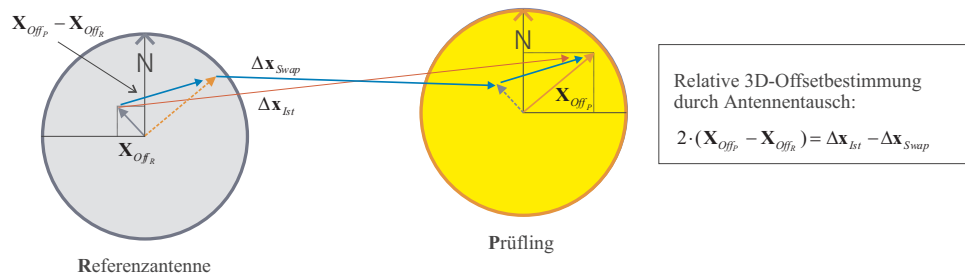


Abbildung 5.2: Offsetbestimmung durch Antennentausch. Aus der Differenz zwischen  $\Delta \mathbf{x}_{Ist}$  und  $\Delta \mathbf{x}_{Swap}$  der Basislinie wird der doppelte relative 3D-Offset abgeleitet.

Frühere Untersuchungen mit vier Beobachtungspositionen (Nord, Ost, Süd, West) zeigten bereits die Vorteile der Nutzung einer Vielzahl von Rotationen hinsichtlich Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung durch Überbestimmung und einer besseren Beobachtungsverteilung (*Menge 1994*). Zur Ableitung absoluter, von einer Referenzantenne unabhängigen Höhen-Offsets sind Kippungen der Antenne notwendig (Abschnitt 5.4).

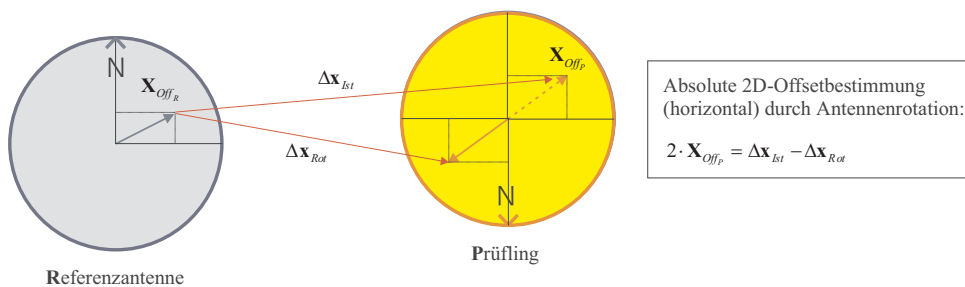


Abbildung 5.3: Offsetbestimmung durch Antennenrotation. Aus der Differenz zwischen  $\Delta \mathbf{x}_{Ist}$  und  $\Delta \mathbf{x}_{Rot}$  der Basislinie wird ein absoluter 2D-Offset (horizontal) abgeleitet.

Neben den verschiedenen grundsätzlichen Verfahren (absolut, relativ etc.) wirken weitere Einflussfaktoren auf die Offsetbestimmung (Abbildung 5.4). Dazu gehören

- Konstellation / geographische Breite Beobachtungsort
- Umgebungseinflüsse / Mehrwegeeffekte
- Wahl Elevationsmaske
- Minimumsbedingung der Modellierung.

Weiterhin beeinflussen bei Relativverfahren auch die Wahl und somit Einfluss der Referenzantenne und die Art und Güte der Basislinienbestimmung die Ergebnisse. Grundsätzlich gelten alle Verfahrensunterschiede und Einflussfaktoren auch für die in den nächsten Abschnitten angesprochenen verschiedenen PCV-Kalibrierungsverfahren.

Die beeinflussenden Faktoren hängen voneinander ab. Der Ort der Beobachtung, seine geographische Breite, ergeben eine spezifische Satellitenkonstellation, sodass das sog. Nordloch bzw.

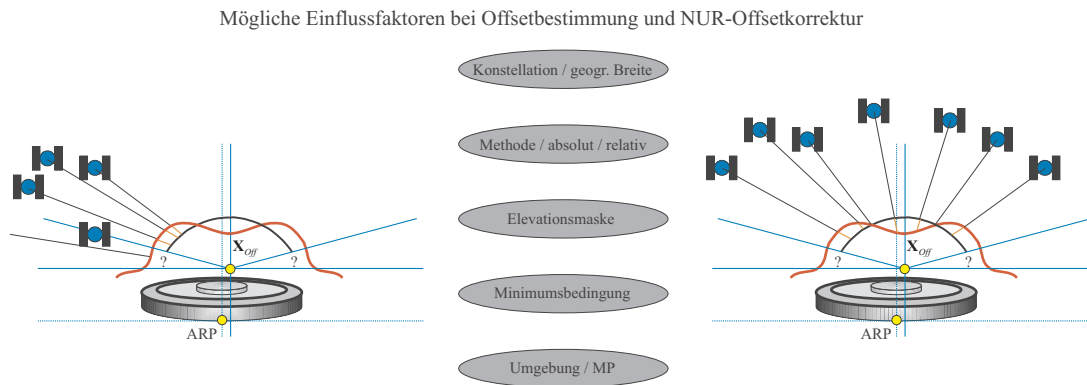


Abbildung 5.4: Einflussfaktoren und Unterschiede auf die Offsetbestimmung. Gleiche Faktoren gelten für Auswertungen, wenn nur Offset (ohne PCV) korrigiert wird.

die nicht mit Beobachtungen abgedeckte Antennenhemisphäre variiert. Zusammen mit der gewählten Elevationsmaske für die Auswertung kann dieses das Ergebnis verändern. Ein mittleres Phasenzentrum gilt prinzipiell nur für die gewählte Messdauer bei vergleichbarer Konstellation. Ebenso von Bedeutung sind mögliche Mehrwegeeffekte. Je nach Ort, Konstellation, Umgebung, Reflektorgeometrie, Beobachtungsdauer und Verfahren sind verschieden starke Effekte auf die Bestimmung der Offsets zu erwarten. Grundsätzlich wirkt bei Offsetbestimmung auf jede Beobachtungssession ein mittlerer Multipath-Einfluss. Dieser Vektor muss den jeweiligen Offsets in (5.1-5.3) noch hinzugefügt werden. Der Einfluss kann über die Wahl des Standortes, des Verfahrens und besonders über die Beobachtungsdauer minimiert werden. Mehrere Beobachtungstage und Drehungen bei gleichen Multipath-Verhältnissen schließen einen Effekt auf die Lagekomponente praktisch aus (*Wanninger 2002*). Wesentlich kritischer ist dieser Fehler bei der PCV-Kalibrierung, wenn keine Beobachtungsmittelungen mehr vorgenommen werden können.

Auswirkungen ergeben sich durch die Wahl der Elevationsmaske und durch die Minimumsbedingung in der Modellierung. Zudem zeigen sich Abhängigkeiten von der Topographie der PCV. Für Definition und Ableitung von Offsets (Abschnitt 4.4.2) findet man als Minimumsbedingung in der Literatur verschiedene Formulierungen teilweise gleichen Inhalts, u.a.

- Mittelpunkt der Schmiegunngskugel an die Phasenfront im Raumwinkel  $\Sigma$ . Mittelung der Abweichungen über den Raumwinkel  $\Sigma$  (*Campbell u.a. 1999*).
- Die Approximierung der Phasenfront eines kleinen Raumwinkels des Strahlungsfeldes der Antennen durch eine Kugeloberfläche. Der Kugelmittelpunkt wird als Phasenzentrum definiert (*Geiger 1988*).
- Minimierung des Flächenintegrals

$$\int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{z=0}^{z_0} \Delta\varphi(\alpha, z) \sin z \, dz \, d\alpha \rightarrow \min$$

der PCV  $\Delta\varphi(\alpha, z)$  über das Zenitintervall  $[0, z_0]$  (*Rothacher u.a. 1995*).

Abbildung 5.5 zeigt den Einfluss der Elevationsmaske von mehreren Millimetern auf den Höhen-Offset am Beispiel von zwei Antennentypen. Die Offsets wurden innerhalb des Verfahrens der

Absoluten Feldkalibrierung aus Beobachtungen eines Aufstellungsortes nachträglich aus den vollständigen absoluten PCV (PCV  $\rightarrow$  min) mit jeweils geänderter Elevationsmaske ( $0^\circ$  bis  $25^\circ$  bzw.  $40^\circ$ ) abgeleitet. Zur Veranschaulichung wurde bei der TRM33429.20+GP dabei bis zu einer Elevationsmaske  $40^\circ$  gerechnet, um den unterschiedlichen Offset auf Grund verschiedener Topographie der  $L_1$ - und  $L_2$ -PCV aufzuzeigen.

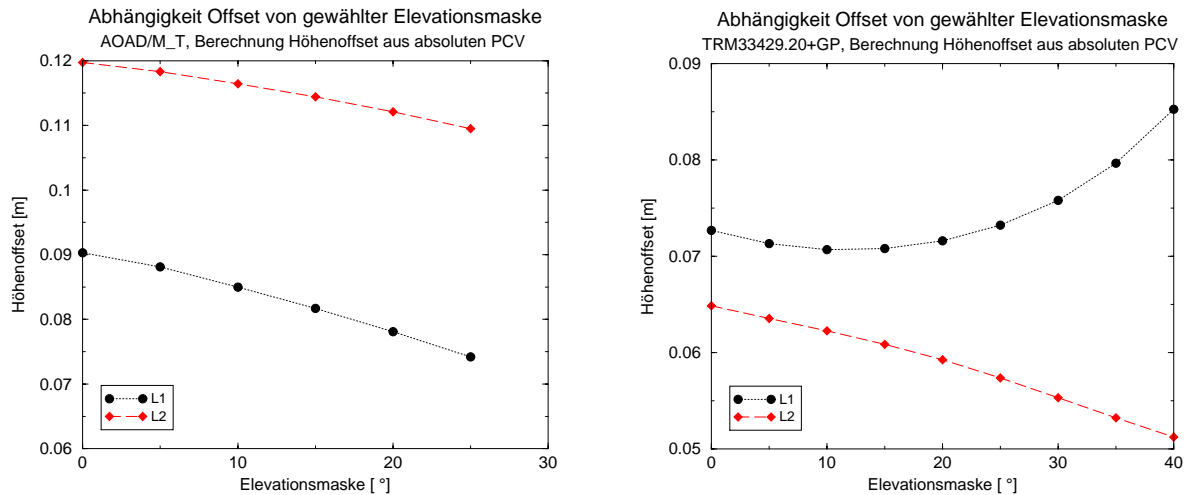


Abbildung 5.5: Abhängigkeit des Höhenoffsets von gewählter Elevationsmaske, Beispiele AOAD/M\_T und TRM33429.20+GP. Offsetbestimmung mit dem Verfahren der Absoluten Feldkalibrierung.

Die Effekte der Elevationsmaske und unterschiedlicher PCV-Topographie manifestieren sich speziell als Unterschiede der mittleren Phasenzentren zwischen verschiedenen Verfahren mit unterschiedlicher Minimumsbedingung. Eine Möglichkeit der Offset-Bestimmung ist seine Ableitung mit Hilfe fester Basiskoordinaten und somit über die Modellierung der Beobachtungen selbst. Dabei wird als Bedingung vorgegeben, dass ein mittleres Phasenzentrum vorhanden ist und dann über den gewählten Beobachtungsausschnitt (Elevationsmaske) gemittelt. Eine andere Möglichkeit ist die oben beschriebene Vorgehensweise der Absoluten Feldkalibrierung, wobei die Offsets nachträglich aus den vorher insgesamt bestimmten PCV abgeleitet werden. Der Antennentyp TRM33429.20+GP ist zur Veranschaulichung gut geeignet, da das *phase pattern* steile Gradienten aufweist. Beispielphaft wird in Tabelle 5.1 der ursprüngliche Offset ( $PCV_{Kugelfkt.8/5} \rightarrow min$ ) umgerechnet. Dabei wird die Kugelfunktion in Grad und Ordnung 1 umgerechnet, was prinzipiell der Schätzung eines Offsets direkt aus den Beobachtungen entspricht. Es ergeben sich Differenzen von fast 1 cm.

Tabelle 5.1: Auswirkung unterschiedlicher Minimumsbedingung auf die Offsetbestimmung (TRM33429.20+GP).

Offsetbestimmung (Höhe) TRM33429.20+GP [m]			
$PCV_{Kugelfkt.8/5} \rightarrow min$		Kugelfkt. 8/5 $\rightarrow$ Kugelfkt. 1/1	Differenz
$L_1 =$	0.073	$L_1 =$	0.068 $\Delta L_1 =$ 0.005
$L_2 =$	0.065	$L_2 =$	0.073 $\Delta L_2 =$ 0.008

Neben den möglichen Einflussfaktoren auf die Größe des mittleren Phasenzentrums ist auch seine

Genauigkeitsangabe selbst mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Dies macht einen Vergleich dieser Angaben zwischen verschiedenen Verfahren nicht immer sinnvoll. Beim relativen Eichbasisverfahren (5.1) und auch beim Rotationsverfahren (5.3) fließen immer nur die Genauigkeit der GPS-Bestimmung ein, wofür als interne Genauigkeitsangabe nur das  $s_0$  der Auswertung vorhanden ist. Zudem müssten zusätzlich Faktoren wie beispielsweise die Genauigkeit der Basislinie und weitere systematische Fehler in ein aussagefähiges Fehlermaß einfließen. Bei der Absoluten Feldkalibrierung werden die Offsets aus den PCV abgeleitet, wobei sich eine Abhängigkeit zwischen Minimumsbedingung bzw. Standardabweichung und Topographie der PCV aufzeigen lässt. Trotz der durchgehenden Verwendung einer kompletten Kovarianzmatrix innerhalb der Auswertung sind die Standardabweichungen für die Offsets verschiedener Antennentypen nicht immer homogen. Die Beispiele in Abbildung 5.6 zeigen deutlich unterschiedliche Genauigkeiten für mehrere Einzelkalibrierungen zwischen ganz unterschiedlichen Antennentypen, trotz einheitlicher Qualität der PCV-Kalibrierung. Die Standardabweichungen variieren zwischen Zehntelmillimetern und mehreren Millimetern. Im Zusammenhang mit der verwendeten Minimumsbedingung (PCV  $\rightarrow$  min) liegt der Grund in diesem Fall in einer Abhängigkeit von der PCV-Topographie. Bei größeren Variationen im *phase pattern*, zum Beispiel durch steile Gradienten und große absolute Werte, wird auch die Standardabweichung der Offsets größer, obwohl die tatsächlichen Wiederholungsgenauigkeiten ähnlich sein sollten. Die Standardabweichungen der Offsets werden besser, wenn die PCV weniger bewegt sind. Dies ist bei den beiden kompakten Rover-Antennen (LEIAT502, TRM39105.00) der Fall. Ihr Empfangsverhalten ist mit kleineren Variationen eher als punktförmig zu charakterisieren (Kapitel 7).

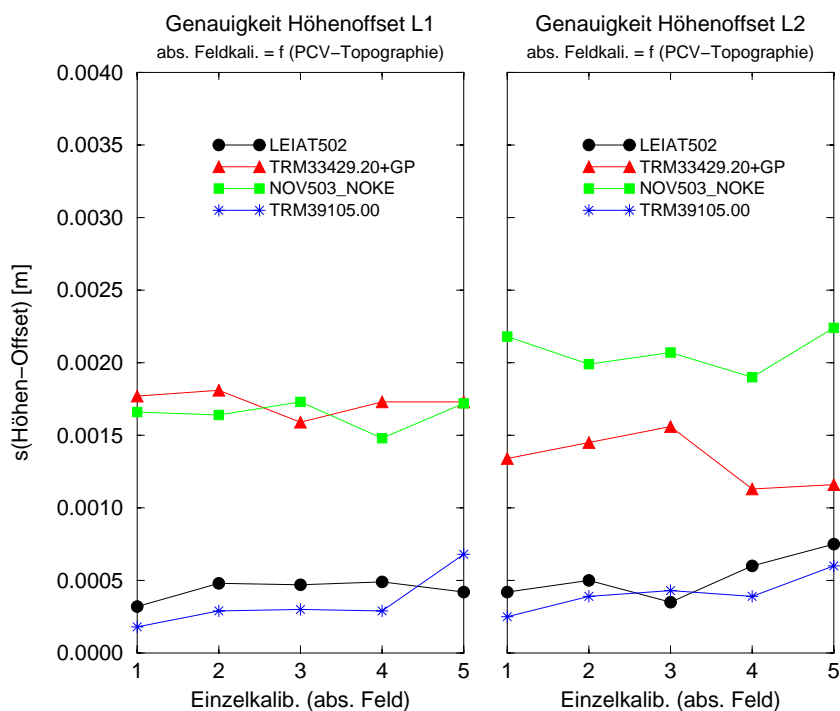


Abbildung 5.6: Abhängigkeit der Offset-Genauigkeit von PCV-Topographie. Auswirkung Minimumsbedingung (PCV  $\rightarrow$  min) der Offsetbestimmung bei Absoluter Feldkalibrierung.

Abbildung 5.7 zeigt die Wiederholbarkeit der Offset-Bestimmung einer individuellen Antenne mit dem Verfahren der Absoluten Feldkalibrierung, um einen Eindruck der erreichbaren Qualität



zu gewinnen. Das in Abschnitt 5.4 beschriebene Verfahren bietet durch seine sehr hohe Beobachtungsdichte bis zum Antennenhorizont eine hohe Zuverlässigkeit für die Bestimmung mittlerer Phasenzentren. Die äußere Genauigkeit für die Lagekomponenten liegt unter 1 mm. Die Höhe ist wie zu erwarten mit 2-3 mm ungenauer.

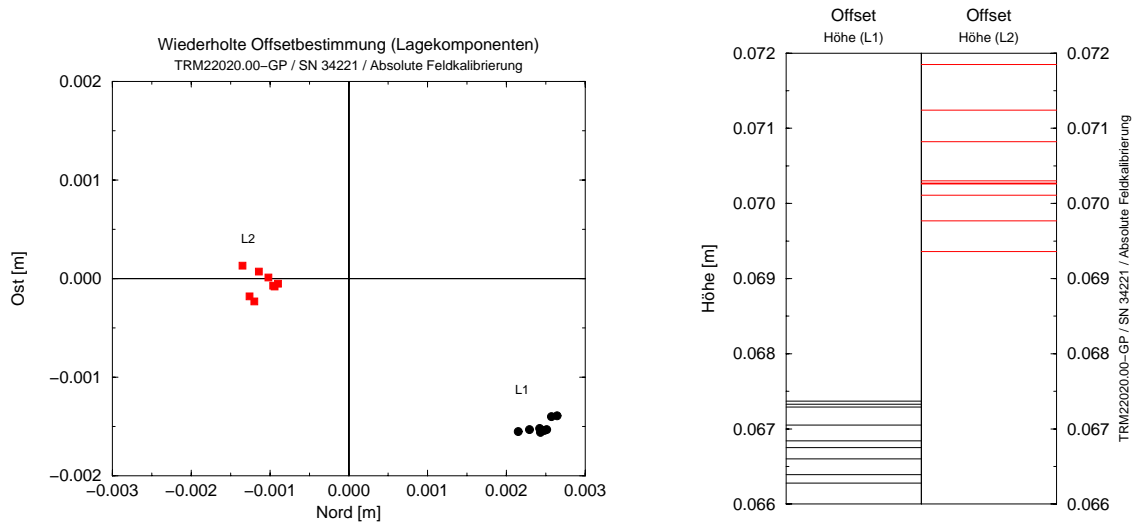


Abbildung 5.7: Wiederholbarkeit der Offsetbestimmung mit dem Verfahren der Absoluten Feldkalibrierung. Mehrfache Offsetbestimmung (9) für eine individuelle TRM22020.00-GP.

In Tabelle 5.2 werden beispielhaft einige Ergebnisse verschiedener Verfahren gegenübergestellt. Alle Offsets werden auf Absolutniveau verglichen (vgl. Abschnitt 6.2). Nur auf einheitlichem Niveau sind Vergleiche möglich. Die Ergebnisse für die Offsets sind von allen aufgezählten Einflüssen (Abbildung 5.4) betroffen. Dazu zählen die gänzlich unterschiedlichen Verfahren, die unterschiedlichen Minimumsbedingungen, die teilweise durchgeführten Rotationen, die verschiedenen Multipath-Umgebungen und Satellitenkonstellationen und auch die Wahl der Elevationsmaske. Beim Verfahren Mader (Abschnitt 5.2) wurden die Relativergebnisse (Eichbasis) nachträglich auf Absolutniveau umgerechnet, wobei somit Offsets aus verschiedenen Verfahren gemischt werden mussten. Beim Verfahren Wanninger (Abschnitt 5.2) wird das Absolutniveau durch das Einführen einer absolut kalibrierten Referenzantenne erreicht. Die Ergebnisse Wanninger und IfE beziehen sich auf dieselbe individuelle Antenne, die von Mader hingegen nur auf den gleichen Antennentyp. Die Lagekomponenten stimmen in der Regel im Bereich  $\leq 1$  mm überein. Es können aber auch Abweichungen von 2 - 3 mm auftreten (LEIAT502). Die Ergebnisse für die Höhe variieren wie erwartet wesentlich stärker im Bereich einiger Millimeter mit maximalen Differenzen von 1 - 2 cm.

Die Wiederholung einer Offsetbestimmung für eine spezielle Antenne kann zur regelmäßigen oder einzelnen Prüfung auf Veränderungen eingesetzt werden. Beispiele sind mögliche Veränderungen auf Grund von Alterung, Schaden oder Reparatur. Die Ergebnisse können auch als erster Anhalt für stark unterschiedliche PCV innerhalb einer Baureihe bzw. eines Typs genutzt werden. Auf diese Weise kann ohne aufwendiges PCV-Kalibrierungsverfahren die Antennenidentität geprüft, aber nicht für höchste Genauigkeitsansprüche im späteren Messeinsatz bestimmt werden.

Ein Offset allein stellt keine vollständige Korrektur für das tatsächliche Empfangsverhalten der Antenne dar. Diverse Einflussfaktoren machen die Offsets aus unterschiedlichen Prüf- und Kalibrierungsmethoden inhomogen und für höchste Genauigkeitsansprüche nicht vergleichbar. Die Zuverlässigkeit der Lage-Offsets ist mit etwas aufwendigeren Prüfungen relativ stabil. Durch Mi-

Tabelle 5.2: Unterschiedliche Kalibrierungsverfahren und Beispiele für die Offsetbestimmung. Unterschiedliche Modellierung. Ergebnisvergleich auf Absolutniveau.

3 Kalibrierungsverfahren - Offset-Vergleich (Absolutniveau) [m]							
Antenne	Verfahren	$L_1$			$L_2$		
		Nord	Ost	Höhe	Nord	Ost	Höhe
TRM33429.20+GP	Mader	0.0002	-0.0015	0.0541	-0.0005	-0.0019	0.0671
	Wanninger	0.0002	-0.0010	0.0576	0.0002	-0.0005	0.0661
	IfE	0.0006	-0.0009	0.0727	0.0002	-0.0004	0.0649
TRM39105.00	Mader	0.0006	-0.0003	0.0524	-0.0008	0.0003	0.0595
	Wanninger	-0.0006	0.0001	0.0555	-0.0016	0.0008	0.0541
	IfE	-0.0001	0.0005	0.0554	-0.0006	0.0016	0.0532
LEIAT502	Mader	0.0009	0.0015	0.0430	-0.0015	0.0012	0.0575
	Wanninger	-0.0001	-0.0012	0.0467	-0.0017	-0.0004	0.0544
	IfE	-0.0006	-0.0011	0.0471	-0.0006	-0.0012	0.0492

schung verschiedener Antennentypen kann der Einfluss auf die spätere Vermessung aber mehrere Millimeter erreichen. Die Höhenkomponente variiert am stärksten. Hier kann teilweise nur eine Zentimetergenauigkeit erreicht werden. Aus diesem Grund sollten für hochpräzise Vermessungen und vor allem für Kurzzeitmessungen nicht nur Offsets als Antennenkorrektur eingesetzt und weiterhin keine Korrekturen unterschiedlicher Verfahren gemischt werden (Kapitel 8). Erst durch die PCV-Bestimmung mit Bezug auf einen Referenzpunkt, zum Beispiel den jeweiligen Offset, erhält man eine vollständige und - je nach Verfahren - orts- und konstellationsunabhängige Korrektur.

## 5.2 Relative Kalibrierung von GPS-Antennen

Anfang der Neunziger Jahre begann im Bereich der Kalibrierung von GPS-Antennen die Entwicklung neuer Verfahren. Durch die ersten grundlegenden Untersuchungen in Kammern (Abschnitt 5.3) waren die Größenordnungen von Phasenzentrumsvariationen längst bekannt. Mit der Etablierung großer Permanentnetze (IGS) begannen Verbesserungen der GPS-Lösungen auch über lange Entfernungen und die Problematik gemischter Antennensysteme wurde erkannt. Maximale Koordinatenfehler bis zu 1 dm können auftreten, obwohl die Phasenzentrumsvariationen selbst nur Millimeter bis Zentimeter betragen (Kapitel 8). Es wurde schnell offensichtlich, dass nicht berücksichtigte PCV der Grund sind. Die Einführung der aus künstlichen Signalen abgeleiteten PCV aus Kammerkalibrierungen bereitete zu diesem Zeitpunkt Probleme, so dass sich das Verfahren der Relativen Feldkalibrierung (*Breuer u.a. 1995, Rothacher u.a. 1995*) entwickelte. Mit diesem weit verbreiteten Verfahren werden die relativen Phasenzentrumsvariationen einer Prüfantenne in Bezug auf eine Referenzantenne bestimmt. Die einfach zu realisierende Messanordnung und Messdurchführung ermöglicht auf diese Weise die Bestimmung von PCV, die für Antennen mit gleicher Orientierung gültig sind.

Eine Kalibrierungsmethode soll hier am Beispiel der Vorgehensweise am NGS (*National Geodetic Survey*) beschrieben werden (*Mader 1999*). Für diese Arbeit wurden keine eigenen relativen Kalibrierungen durchgeführt. Für Vergleiche können Relativ- aus Absolutergebnissen abgeleitet werden. Prinzipiell ist die Relativkalibrierung auch mit der verwendeten Software GEONAP möglich (*Völksen 2000*). Die relativen PCV-Korrekturen des NGS sind die am häufigsten genutzten

und stehen frei im Internet zur Verfügung.

Bei diesem Verfahren werden nur elevationsabhängige Phasenzentrumsvariationen aus statischen Beobachtungen auf einer bekannten Basislinie bestimmt. Referenzantenne ist die mit einem Choke Ring versehene AOAD/M\_T, die im IGS am weitesten verbreitet ist. Diese Referenzantenne wird als Internationaler Standard anerkannt (Abschnitt 6.2). Die kurze Basislinie wurde aus vielen Messungen mit als identisch angesehenen AOAD/M\_T bestimmt. Dabei werden definierte Offsets (Höhenkomponente) von  $L_1 = 0.110$  m und  $L_2 = 0.128$  m festgehalten. Wird eine AOAD/M\_T durch einen Prüfling ersetzt, so lassen sich direkt seine Offsets ableiten. Es wird mit einer  $15^\circ$  Elevationsmaske eine 24h - Messung ausgewertet. Mit Bezug auf die vorab bestimmten mittleren Phasenzentren werden im Anschluss die relativen PCV bestimmt.

Die Modellierung erfolgt über Einfache Differenzen, um die relativen PCV direkt und nicht - wie bei der Verwendung Doppelter Differenzen - aus der Differenz zwischen zwei Satelliten zu bestimmen. Fehler durch Ionosphäre und Troposphäre spielen auf einer kurzen Basis keine Rolle. Die Mehrdeutigkeiten können einfach gelöst werden. Die Koordinaten der Basislinie sind hochgenau bekannt und enthalten in diesem Fall die vorher bestimmten Referenzoffsets für die jeweilige Frequenz. Es verbleibt analog zu (3.11) für die Einfache Differenz

$$\Delta\Phi_{ij}^k = c_0 \cdot (dT_i - dT_j) + \Delta d_{PCV_{rcv}}^k + \Delta d_{MP_{rcv}}^k + \varepsilon_{ij}^k. \quad (5.4)$$

mit den differentiellen Uhrfehlern der Empfänger und den PCV-Differenzen. Ebenso können trotz identischer Empfängertypen noch differentielle Hardware delays enthalten sein. Ein Fehler durch Mehrwegeeffekte fällt in der Differenz nicht heraus. Durch Verwendung eines externen Frequenznormals (hier: Rubidium-Oszillator) werden die größten Variationen durch unterschiedliche Uhrfehler der beiden Empfänger beseitigt. In der Beobachtungsgleichung im Ausgleichungsprozess wird ein Polynom 4. Ordnung für die elevationsabhängigen PCV (Elevationswinkel  $e$ , Satellit  $k$ ) und zusätzlich für jede Epoche  $t$  eine Uhrkonstante  $\tau$  für die verbleibenden differentiellen Uhrfehler geschätzt.

$$\Delta\Phi_{ij}^k(t) = \tau(t) + a_1 \cdot e^k(t) + a_2 \cdot e^k(t)^2 + a_3 \cdot e^k(t)^3 + a_4 \cdot e^k(t)^4. \quad (5.5)$$

Eine Konstante  $a_0$  kann für das Polynom nicht modelliert werden. Diese ist nicht von der Uhr zu trennen und hat folglich auch keinen Effekt in einer späteren Auswertung. Weitere mögliche Fehler wie Multipath werden in die Modellierung mit aufgenommen und sollten bereits durch den Beobachtungsstandort klein gehalten werden. Zudem werden aus diesem Grund nur PCV vom Zenit bis  $10^\circ$  Elevation geschätzt. In Bezug auf die fixierten Offsets der Referenzantenne wird postuliert, dass keine weiteren PCV mehr vorhanden sind. Dies bedeutet, dass die tatsächlichen PCV der AOAD/M\_T bezüglich dieses Referenzoffsets in den Relativkorrekturen enthalten sind (Abbildung 6.11). Dies gilt für alle Relativverfahren. Die Ergebnisse werden in Tabellenform bereitgestellt, da Polynom-Koeffizienten für Standardsoftware nicht geeignet sind.

Andere Relativverfahren weisen teilweise unterschiedliche Modellierungen auf. Neben Einfachen Differenzen werden Doppelte Differenzen und auch undifferenzierte Beobachtungen genutzt, meist ohne Frequenznormal für die Empfängeruhren. Einige Verfahren nutzen Drehungen des

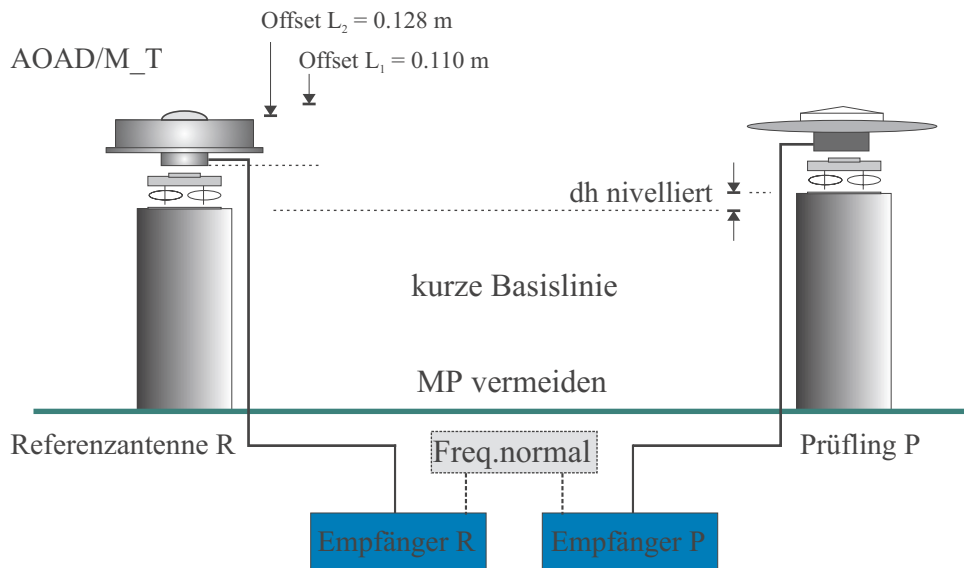


Abbildung 5.8: Prinzipieller Messungsaufbau bei relativer Feldkalibrierung nach *Mader (1999)*. Mögliche Unterschiede in Beobachtungstypen, Offsetbestimmung, Antennendrehungen, Modellierung etc.

Prüfings und auch der Referenz. Zur Ableitung elevationsabhängiger PCV muss die Höhenkomponente der Basislinie festgehalten werden. Für die zusätzliche Bestimmung azimuthaler PCV werden alle drei Basislinienkomponenten festgehalten (*Rothacher u.a. 1995*) oder Referenz- und Prüfingantenne gleichermaßen rotiert (*Wanninger 2002*). Drehungen haben einen zusätzlichen Vorteil hinsichtlich einer Mittelung von Mehrwegeeffekten und der verbesserten Abdeckung der Antennenhemisphäre mit Beobachtungen. Das typische Nordloch in mittleren Breiten entsteht auf diese Weise nicht. Die Korrektur der Referenzantenne mit absoluten PCV erlaubt auch mit Relativverfahren die Bestimmung absoluter Korrekturen. Hinzu kommt in diesem Fall, dass bei Drehungen der zu prüfenden Antenne die Referenzantenne nicht mehr mitgedreht werden muss. Die PCV werden schließlich über

- Polygone (z.B. *Rothacher u.a. 1995, Kaniuth u.a. 1998*)
- Polynome (z.B. *Breuer u.a. 1995, Mader 1999*)
- Kugelfunktionsentwicklungen (z.B. *Rothacher u.a. 1995, Wanninger 2002*)

modelliert. Die Zenitbedingungen, die Lagerung der PCV, sind teilweise unterschiedlich in den genannten Verfahren. *Wanninger und Böhme (2000)* nutzen zum Beispiel eine mittlere Lagerung über den Elevationsbereich von  $25^\circ$  bis  $75^\circ$  über die Bedingung  $\sum_{25^\circ}^{75^\circ} \Delta\varphi_{PCV}(e) \equiv 0$ , um auf diese Weise Datenprobleme durch das Nordloch bzw. durch die Beobachtungen aus niedrigen Elevationsbereichen zu vermeiden. Prinzipiell ist eine andere Lagerung unproblematisch, da eine unterschiedliche Höhenreferenz  $\Delta z$  (4.50) sich als einheitliche Korrektur an allen PCV-Werten auswirkt und durch Bestimmung oder Elimination des Uhrfehlers keine Wirkung hat (Abschnitt 4.4.2). Dies wurde bereits in (5.5) beim Verfahren des NGS angesprochen. Möglicherweise haben jedoch Unterschiede der jeweiligen Modellierung im Zusammenhang mit der Satellitenkonstellation und dem Einfluss von Multipath systematische Effekte auf die PCV, wie sie in Vergleichen verschiedener Verfahren auftreten (Abschnitt 6.3).

Hauptinflussfaktoren bei den Relativverfahren sind die Abdeckung der Antennenhemisphäre mit Beobachtungen (Nordloch, Abstand der Satellitenspuren) und Mehrwegeeffekte. Besonders beeinträchtigt wird dadurch die Bestimmung von azimutalen PCV und von PCV für niedrige Elevationen. Ein Großteil der Verfahren verzichtet auf die Ableitung dieser Korrekturen. Je nach Kalibrierungsumgebung und genutztem Antennentyp im Zusammenhang mit dem eingesetzten Verfahren variieren die Effekte durch Multipath. *Wanninger (2002)* beschreibt die Möglichkeiten der Relativverfahren speziell auf Grund der Mehrwegeeffekte. Die Genauigkeit der PCV beeinträchtigende Faktoren sind immer kritisch zu bewerten. Der Hinweis auf später bei der Messung zusätzlich auftretende Mehrwegefehler ist insofern für hochpräzise Anwendungen nicht genügend, da schon nach einigen Messepochen eine Mittelung von Multipatheffekten auftreten kann. Der PCV verbleibt jedoch immer als systematischer Fehler in den Beobachtungen. Zudem sind für bestimmte Antennen azimutale Variationen nicht zu vernachlässigen und auch Beobachtungen in niedrigen Elevationsbereichen sind speziell für die präzise Höhenbestimmung von Bedeutung.

### 5.3 Absolute Kammerkalibrierung von GPS-Antennen

Die Grundlagen dieser normalerweise nicht geodätischen Anwendung wurden bereits in Kapitel 4 dargestellt. Die frequenzabhängige Richtcharakteristik einer Antenne beschreibt die räumliche Verteilung der empfangenen Leistung im Fernfeld. Für eine vollständige Beschreibung werden Amplitude und Phase der Richtcharakteristik ko- und kreuzpolar über eine Kugeloberfläche gemessen (*Suckrow u.a. 1995*). Das Strahlungsverhalten und andere elektrische Eigenschaften der Antenne werden auch vom sie umgebenden Raum mitbestimmt, sodass eine entsprechend geeignete Antennen-Messstrecke für eine hohe Qualität der Messgenauigkeiten erforderlich ist. Hier müssen hohe Anforderungen aus elektrotechnischer Sicht gestellt werden. Für den geodätischen Nutzer ist auch eine Aussage über die Amplitude (Gewinn) und andere Eigenschaften wie das Axialverhältnis von praktischem Nutzen. An dieser Stelle wird aber die Anwendung der Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen für die Anwendung aus vermessungstechnischer Sicht beschrieben. Für einen detaillierten elektrotechnischen Überblick der vielfältigen Messmöglichkeiten auf unterschiedlichen Messstrecken wird auf *Stirner (1985)* und für spezielle Untersuchungen zum Beispiel auf *Wohlleben u.a. (1988)* verwiesen.

Die Messungen werden in einem so genannten "mikrowellentoten" Raum (*anechoic chamber*) oder Absorberhalle ausgeführt, um weitgehend alle die Ergebnisse verfälschenden Reflexionen auszuschließen. Die Wände und möglichst alle reflektierenden Flächen sind mit HF-absorbierendem Material ausgestattet, zum Beispiel mit Pyramiden-Absorbern. Da Fernfeldmessungen innerhalb eines Raumes durchgeführt werden, variieren die Dimensionen der Kammern sehr stark. Je nach Frequenzbereich (HF oberhalb 100 - 150 MHz) und den Dimensionen der eingesetzten Antennen variieren die Maße zwischen wenigen Metern (*Bartels 1995*) und bis zu mehr als 20 m Länge (*Imakiire u.a. 1997*). Relativ früh in der GPS-Entwicklung wurden Kammermessungen durchgeführt und zeigten mögliche Größenordnungen der PCV für die ersten verfügbaren Antennen (*Sims 1985*). Auch wurden bereits zu dieser Zeit die Auswirkungen verschiedener Konstruktionen auf die Antennencharakteristik mit dieser Methode analysiert und quantifiziert (*Tranquilla und Colpitts 1989*).

Die eingesetzten Kammern sind unterschiedlich bezüglich der mechanischen Ausstattung und dem Computereinsatz. Es haben zudem in den letzten Jahren Entwicklungen in der Automatisierung von Messung und Auswertung stattgefunden. Abbildung 5.9 zeigt skizzenhaft einen einfachen Aufbau einer *anechoic chamber*. Die Prüfeinrichtung für die zu kalibrierende Antenne

weist als Freiheitsgrade der Mechanik die Translation quer (x) und längs (y) zur Sendeantenne und eine Drehung um die z-Achse auf. Damit kann der Prüfling hochgenau horizontal über einen Rotationspunkt verschoben werden. Die Antenne kann in diesem speziellen Punkt quer zum Referenzstrahler gedreht werden. Somit kann die elevationsabhängige Antennencharakteristik erfasst werden. Eine unterschiedliche azimutale Einspannung der Antennen ist manuell möglich. Die Positionierungseinrichtungen (*multi-axis positioner*) anderer Kammern haben drei Translations- und zwei Rotationsmöglichkeiten (*Schupler und Clark 1991*). Als Sendeantennen können verschiedene Modelle genutzt werden, zum Beispiel eine rechtshändig zirkular polarisierte konische Spiralantenne für Phasen- und Amplitudenmessungen und eine rotierende, linear polarisierte Hornantenne für die Bestimmung des Axialverhältnisses (*Schupler und Clark 1994*). Wichtig ist eine stark gerichtete Strahlungskeule, also eine Abstrahlung in einem möglichst kleinen Winkelbereich. *Schupler und Clark (2001)* verwenden in einer vollständig automatisierten Auswertung einen Dipol als Strahlungsquelle, der rechnergestützt rotiert und horizontal und vertikal polarisiert werden kann. Die Auswertesoftware berechnet aus beiden die Antennencharakteristik für rechts- und linkshändig zirkular polarisierte Wellen.

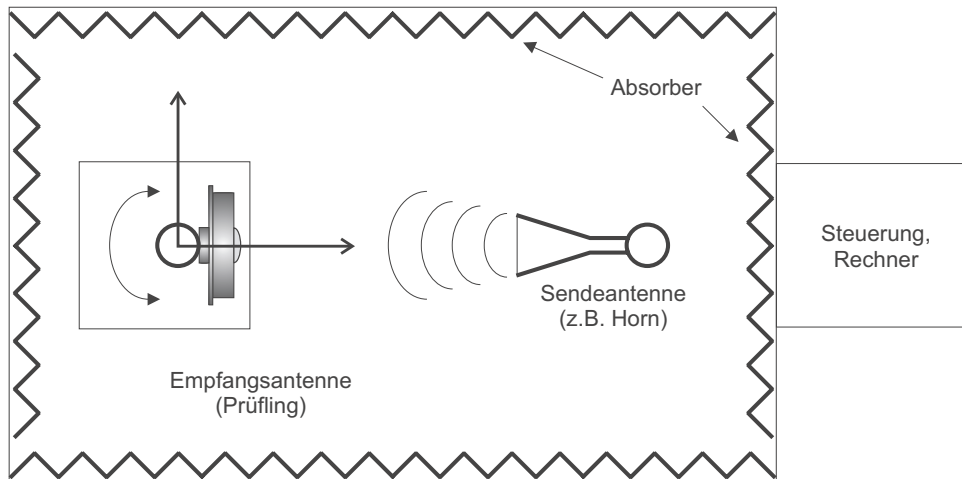


Abbildung 5.9: Prinzipieller Messaufbau der Kammerkalibrierung nach *Bartels (1995)*.

Aus den mechanischen Gegebenheiten der Positionierungseinrichtungen leitet sich die Vorgehensweise für die Bestimmung des mittleren Phasenzentrums jeder Frequenz ab, die manuell oder teilautomatisiert ablaufen kann. Es können zum Beispiel Phasenmessungen für Serien von Elevationsschnitten in verschiedenen Azimuten der Antenne gemessen werden. Dabei wird die Prüfantenne - in den vorhandenen Translationsfreiheitsgraden - relativ zu den Rotationsachsen der Positionierungseinheit ausgerichtet, bis das *phase pattern* in allen Azimuten bestmöglich symmetrisch zur vertikalen Antennenachse liegt und die Phasenvariationen minimiert sind. Die Symmetrie wird durch Querverschiebung zur Hauptstrahlungsrichtung erreicht, wobei die Endposition dann dem mittleren Lage-Offset entspricht. Die Erzeugung minimaler Variationen - flacher Phasenkurven - gelingt mit der Verschiebung in Richtung der Sendeantenne, wobei für das Minimum dann der mittlere Höhenoffset bestimmt ist. Die Minimierung der Phasenvariationen entspricht prinzipiell den Bedingungen zur Offsetbestimmung in Feldmessungen. Zudem muss auch in der Kammermessung auf Grund der Abhängigkeit des Phasenzentrums von der Elevationsmaske der Winkelbereich für die Antennendrehungen gewählt werden. Ergebnis des Verfahrens ist die Positionierung des mittleren Phasenzentrums über den Rotationsachsen der Prüfeinrichtung. Der

Vektor zum ARP der Antenne muss anschließend hochgenau vermessen werden.

Nach der Lagerung des mittleren Phasenzentrums im Rotationspunkt wird diese Position nicht mehr verändert. Es folgt die Messung der Phasenvariationen für alle Elevationen ohne Winkelbegrenzung, auch unterhalb der Grundplatte und in verschiedenen Azimuten. Gleichzeitig können die Messungen für Amplitude, Axialverhältnisse etc. durchgeführt werden. Bei *Schupler und Clark (2001)* wird nach den automatisierten Messungen aus den berechneten PCV das mittlere Phasenzentrum über den gewählten Elevationsbereich abgeleitet, ähnlich dem Absoluten Feldverfahren (vgl. nächster Abschnitt). Der Offset wird nicht vorher bestimmt. Es muss aber der Rotationspunkt - als Referenz für die abgeleiteten Phasenvariationen - genau relativ zur Antenne eingemessen werden. Dies geschieht mittels Laser, Lot und einer Art Messtisch.

Kammerkalibrierungen von Antennen können einen Beitrag für die Vermessung liefern. Besonders grundsätzliche Untersuchungen verschiedener Antennencharakteristika werden dabei durchgeführt. Das Verfahren kann für die regelmäßige Nutzung zur individuellen, hochpräzisen PCV-Kalibrierung einige Defizite aufweisen:

- künstliches Signal
- Operationalität (Kosten, Zeitaufwand)
- mechanische Präzision
- Kammerrestfehler.

Die Nutzung eines künstlichen Signals ist theoretisch kein Nachteil, da hier exakt Frequenzen und Polarisation berechnet werden können. Die Messungen entsprechen aber nicht der praktischen Anwendung der Antenne mit den tatsächlichen komplexen GPS-Signalen. Das Hauptproblem ist die fehlende Operationalität des Verfahrens. Der regelmäßige Zugang zu derartigen Messstrecken kann nicht gewährleistet werden, da diese teuren und hochtechnisierten Einrichtungen für vielfältige elektrotechnische Anwendungen ständig im Gebrauch sind. Zusammen mit dem hohen Aufwand, vor allem für manuelle Messungen, begründet dies, dass eine dauerhafte Kalibrierstelle für umfangreiche und wiederholte Messprogramme nicht vorgehalten werden kann. Die mechanische Präzision der Positionierungseinheit kann zu Genauigkeitsminderungen beitragen. Normalerweise müssen die Positionierungseinrichtungen (Rotationen, Translationen) sehr genau sein. Die Einmessung des Bezuges zur Antenne besser als die angestrebte PCV-Genauigkeit im Millimeter- und Sub-Millimeter-Bereich bereitet Schwierigkeiten. Dies zeigen auch die Erfahrungen mit der automatisierten Absoluten Feldkalibrierung (vgl. nächsten Abschnitt).

Die Kammer kann Restfehler aus elektrotechnischer Sicht aufweisen. In der Praxis wird es keine ideale Messstrecke geben. Verbleibende Reflexionen können die Messungen beeinflussen. Dazu zählen Abstimmungsprobleme der Absorber bzw. der Abschirmung bezüglich der verwendeten Frequenzen und Fremdeinstrahlung. Es können weiterhin nicht nur Reflexionen an den Antennen-einrichtungen (Positionierungseinheit, Halterungen), sondern zusätzlich Randbeugungseffekte und Rückstreuungen an Öffnungen, Kanten (Türen, Messeinrichtungen) die Gleichmäßigkeit des Wellenfeldes im Raum stören. Eine endliche Richtschärfe der Sendeantenne, nicht ideale Abschlüsse, Übergänge und Adapter können die Messungen ebenso beeinflussen wie ein Kabel, welches die Impedanz der Antenne transformieren und die hin-rücklaufende Welle dämpfen kann. Die Eigenschaften der Sendeantenne müssen theoretisch exakt berechenbar sein. Einige Messfeldveränderungen können vor dem eigentlichen Verfahren ausgemessen und später rechnerisch angebracht werden. Ebenso können bestimmte Reflektoren mathematisch korrigiert werden.

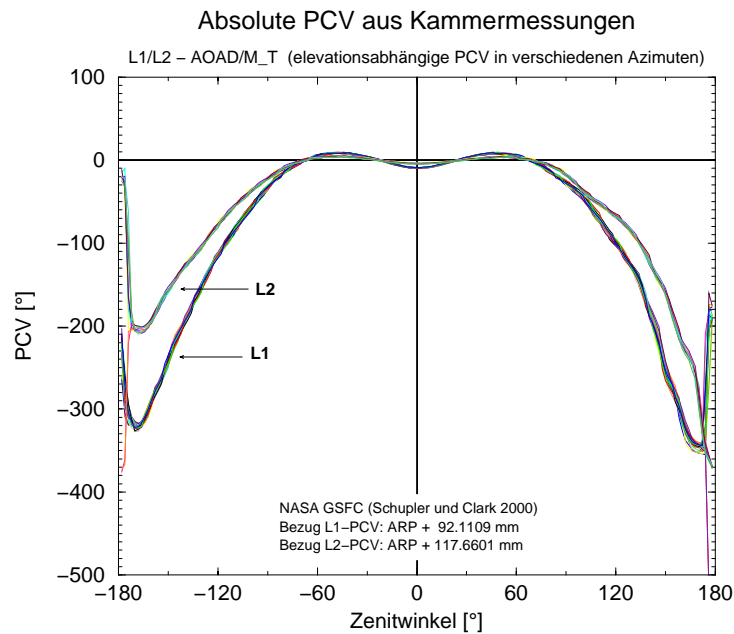


Abbildung 5.10: Absolute PCV der AOAD/M\_T ( $L_1$ ,  $L_2$ ) aus Kammermessungen, NASA GSFC. Dabei werden auch Phasenmessungen im negativen Elevationsbereich unterhalb der Grundplatte durchgeführt.

Abbildung 5.10 zeigt Originalergebnisse der Messkammer der NASA am GSFC aus dem Jahr 2000 (*Schupler und Clark 2000*). Dargestellt sind die elevationsabhängigen Phasenkurven für eine AOAD/M\_T in verschiedenen Azimuten. Neben der guten Übereinstimmung für unterschiedliche Azimute ist hinsichtlich der Verfahrensentwicklung der Absoluten Feldkalibrierung besonders die durchgehende Phasenkurve unterhalb der Grundplatte von Interesse. Obwohl hier ein reines Diffraktionssignal (Kantenbrechung) vorliegt, wird ausgehend vom direkten Signal eine stetige Phasenkurve über die Kante der Grundplatte hinweg gebildet. Quantitative Vergleiche zwischen dem Absoluten Feld- und Kammerverfahren finden sich in Abschnitt 6.4.

## 5.4 Absolute Feldkalibrierung von GPS-Antennen

Der Anlass für die Entwicklung eines hochgenauen absoluten Feldverfahrens bestand vor allem in der Erkenntnis von Defiziten bereits vorhandener Kalibrierungsmethoden. Die Verwendung reiner mittlerer Phasenzentren reicht als Korrektur für hochpräzise Anwendungen in der Regel nicht aus. Relative Kalibrierungsverfahren weisen Einschränkungen für eine universelle Nutzung auf. Dazu gehören Defizite bezüglich einer hohen Auflösung der PCV, speziell bis zum Antennenhorizont, und ihre Gültigkeit nur für gleiche Ausrichtung der Antennen. In globalen und kinematischen Anwendungen (Kapitel 8) sind Relativkorrekturen nicht mehr streng gültig (*Menge und Seeber 2000*). Auch absolute Kammerverfahren sind in Genauigkeit und Operabilität beschränkt.

Absolute Korrekturen für PCV aus einem GPS-Feldverfahren weisen im Gegensatz zu Relativverfahren eine Unabhängigkeit von einer Referenzantenne auf, nicht wirklich ein absolutes Niveau. Absolute PCV beschreiben die Topographie der Phasenvariationen, beinhalten jedoch noch einen



Maßstab. Dieser konstante Anteil beruht auf der nicht möglichen Trennung von Uhrfehlern und Laufzeitverzögerungen in der Hardware. Prinzipiell hat diese Konstante in der späteren GPS-Auswertung durch seine Modellierung als Uhrfehler keinen Einfluss. Sie kann aber in zukünftigen Entwicklungen bezüglich absoluter Ionosphäre, absoluter Troposphäre und hochpräziser Zeitübertragung auf Phasenbasis Bedeutung erlangen (*Wübbena und Schmitz 2002*).

Das Absolute Feldkalibrierungsverfahren wurde in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Gemeinschaftsprojekt des Instituts für Erdmessung und der Firma Geo++<sup>®</sup> entwickelt. Aus einem manuellen Verfahren im Post-Processing, aufsetzend auf Tagesdifferenz-Beobachtungen und der Nutzung einer Eigenentwicklung für einen Antennenunterbau, hat sich ein automatisiertes Echtzeitverfahren mit einem Roboter entwickelt. Die Darstellung des Verfahrens nimmt einen breiten Raum in dieser Arbeit ein, um die Entwicklungen und Fähigkeiten aufzuzeigen. Zudem werden speziell die eigenen Ergebnisse aus diesem Verfahren in späteren Vergleichen und Anwendungen genutzt.

### 5.4.1 Grundlagen des Verfahrens - Post-Processing

Die grundsätzliche Idee für das Absolute Feldkalibrierungsverfahren ist die Entwicklung einer Feldmethode, bei der die Korrekturen unabhängig von den PCV der Referenzantenne und möglichst ohne Einfluss durch Mehrwegefehler berechnet werden können. Ersteres bedeutet, dass der Antennenprüfling nicht nur horizontal rotiert sondern auch vertikal gekippt werden muss. Die weitgehende Elimination von Multipath und somit eine Trennung von PCV und Multipath erfolgt durch die Nutzung spezieller Beobachtungsdifferenz zwischen zwei Tagen. Der Ansatz beruht auf undifferenzierten Beobachtungen. Diese erste Variante der Absoluten Feldkalibrierung im Post-Processing-Verfahren wurde in die GPS-Auswertesoftware GEONAP implementiert (*Wübbena u.a. 1996, Seeber u.a. 1998*).

Der Haupteinfluss auf die Ableitung von Phasenzentrumsvariationen in GPS-Feldverfahren ist der Fehler durch Mehrwegesignale. Durch eine spezielle Vorgehensweise kann eine weitgehende Trennung von den PCV vorgenommen werden, um möglichst stationsunabhängige Ergebnisse abzuleiten. Zur Multipath-Elimination bzw. einer weitgehenden Reduktion kann die sich nach einem siderischen Tag wiederholende Satellitenkonstellation ausgenutzt werden. Mehrwegefehler sind von der Geometrie zwischen Satellit, Reflektor und Empfangsantenne abhängig (Abschnitt 3.2.2). Aus diesem Grund kann bei unveränderter Satellitengeometrie und Stationsumgebung eine Wiederholung der Mehrwegefehler nach einem siderischen Tag angenommen werden.

Vom gleichen Standort der Erdoberfläche aus gesehen erscheinen die Satelliten nach zweifachem Umlauf wieder in exakt derselben Richtung wie am Vortag. Der allgemein angenommene Wert für die Periode der Konstellationswiederholung von einem Sterntag beträgt 24 h - (3 min 56 s). Die Satelliten erscheinen also jeden Tag ungefähr 4 min früher an gleicher Stelle. Die Differenz  $\delta t^{SID}$  [s] zwischen einer doppelten Satellitenumlaufzeit  $T$  und einem mittleren Sonnentag (24 h = 86400 s) kann aus den Broadcast-Ephemeriden abgeleitet werden (*ARINC 1991*).

$$\delta t^{SID} = 2 \cdot T - 86400 \quad (5.6)$$

wird berechnet über

$$T = \frac{2\pi}{n} \quad (5.7)$$

$$n = n_0 + \Delta n \quad (5.8)$$

und mit

$$n_0 = \sqrt{\frac{GM}{A^3}} = \frac{\sqrt{GM}}{(\sqrt{A})^3}. \quad (5.9)$$

Die korrigierte mittlere Satellitenbewegung  $n$  [rad/s] ist die Summe aus berechneter mittlerer Bewegung  $n_0$  und dem Störungsparameter  $\Delta n$ . Die Wurzel der großen Halbachse  $A$  der Keplerellipse und  $\Delta n$  sind Parameter aus den Bahnephemeriden. Abbildung 5.11 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für die Satelliten an drei aufeinander folgenden Tagen. Die Abweichungen der einzelnen Satelliten pro Tag sind mit unter einer Sekunde so gering, dass sie graphisch nicht erkennbar sind.

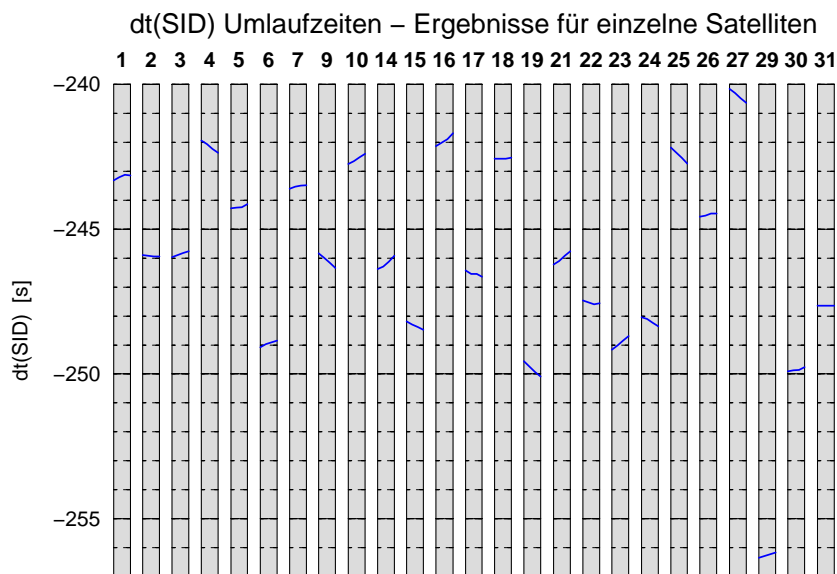


Abbildung 5.11: Differenz zwischen Umlaufzeiten ( $2 \cdot 12$  h) einzelner Satelliten und einem mittleren Sonntag. Dargestellt werden für jeden Satelliten die Ergebnisse von drei aufeinander folgenden Tagen.

Die Werte für  $\delta t^{SID}$  schwanken in verschiedenen Untersuchungen mit Daten eines kompletten Jahres zwischen minimal -235 s und -255 s. Umfangreiche Analysen auch von anderen Parametern wie beispielsweise von Azimut- und Elevationszeitreihen und wie der Kreuzkorrelation von Residuen Doppelter Differenzen (Abbildung 5.13) ergaben ähnliche Werte und meist ein

Mittel von ca. -245 s (*Köhncke 1998*). Innerhalb weniger Tage verändern sich die Umlaufzeiten individueller Satelliten kaum. Im Laufe des Jahres treten teilweise Änderungen im Sekundenbereich auf. Dies wird in Untersuchungen anderer Gruppen bestätigt, die Bahnverschiebungen verschiedener Satelliten in der Größenordnung von 1 - 3° über ein Jahr festgestellt haben (*Wanninger und May 2000*). Es muss während Bahnmanövern aber mit erheblich größeren Veränderungen über einige Tage gerechnet werden.

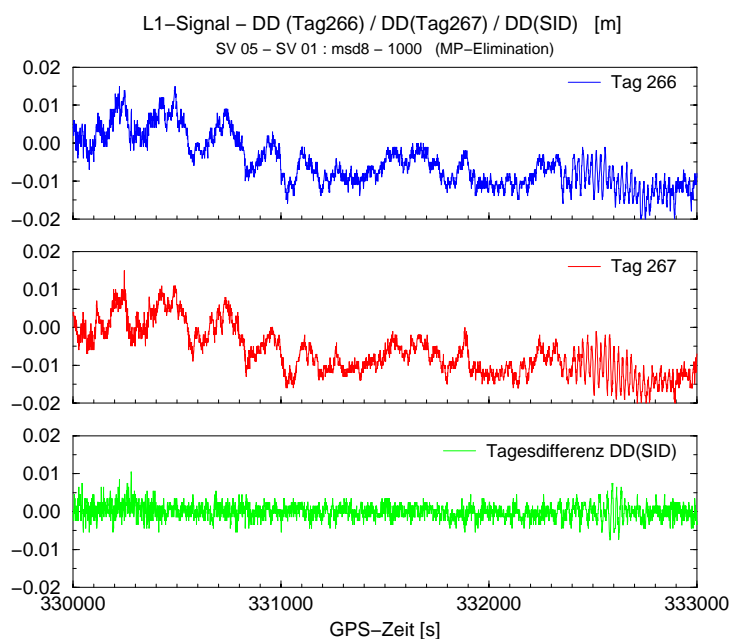


Abbildung 5.12: Elimination/Reduktion von Mehrwegeeffekten durch Tagesdifferenzen. An den Residuen der GPS-Ausgleichung sind gleiche MP-Effekte an aufeinander folgenden Tagen zu erkennen ( $DD$  Tag 266 und 267, Tagesdifferenz  $DD$ ).

Die sich täglich wiederholenden Mehrwegefehler lassen sich in Analysen der Residuen von GPS-Auswertungen verifizieren. Abbildung 5.12 zeigt Doppelten Differenzen von zwei aufeinander folgenden Tagen in hochreflektiver Umgebung (Messdach Geodätisches Institut, Universität Hannover). Bestimmte Multipath-Signale wiederholen sich an beiden Tagen. Durch die Bildung der siderischen Tagesdifferenz der Doppelten Differenzen mit einer Verschiebung von  $24\text{ h} + \delta t^{SID}$  ergibt sich die untere Graphik, bei der Multipath fast vollständig eliminiert ist und sich dadurch ein deutliches Absinken des Rauschniveaus ergibt.

Die Verifikation von  $\delta t^{SID}$  gelingt direkt über die Beobachtungsresiduen (Abbildung 5.13). Aus der Kreuzkorrelation Doppelten Differenzen lassen sich die oben genannten Ergebnisse bestätigen. Unter Berücksichtigung eines geeigneten Wertes können auf diese Weise die Beobachtungen zweier Tage voneinander subtrahiert werden. Dabei heben sich alle Fehler auf, die sich nach einem Sterntag wiederholen. Die Umsetzung in der GPS-Auswertung wird am Beispiel der Linearisierung des Funktionalen Modells einer einfachen Ausgleichung beschrieben (*Pelzer 1985*). Mit der Designmatrix  $\mathbf{A}$ , den Unbekannten im gekürzten Parametervektor  $\mathbf{x}$  und den Verbesserungsvektor  $\mathbf{v}$  ergibt sich der bekannte gekürzte Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  zu

$$\mathbf{l} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{v}. \quad (5.10)$$

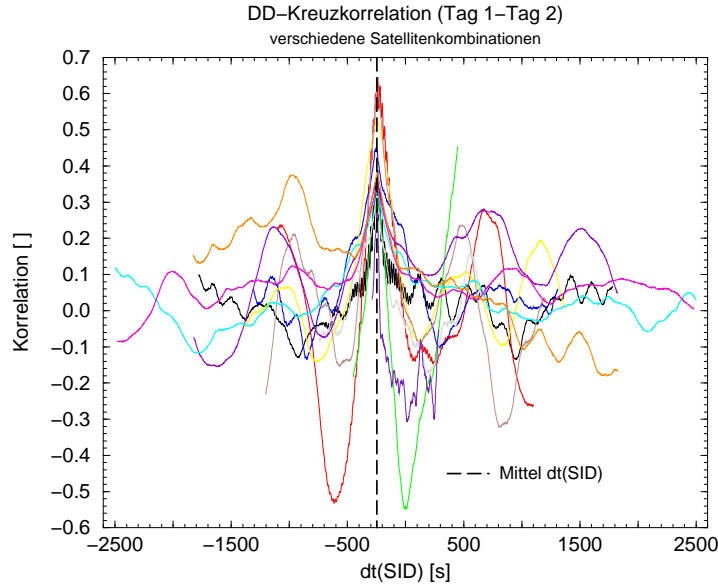


Abbildung 5.13: Kreuzkorrelation DD-Residuen aufeinander folgender Tage für verschiedene Satellitenkombinationen.

Eine vereinfachte linearisierte Beobachtungsgleichung (vgl. 3.8) eines einzelnen Phasensignals für eine Station  $i$  und einen Satelliten  $k$  lautet:

$$\begin{aligned}
 l_{\Phi_i}^k &= \mathbf{a}_i^k \cdot \mathbf{x}_i + c_0 \cdot (dt^k - dT_i) + \lambda \cdot N_i^k \\
 &- d_{Ion_i}^k + d_{Trop_i}^k + d_{PCV_{rcv}_i}^k + d_{MP_{rcv}_i}^k + \varepsilon_i^k - v.
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Die Submatrix  $\mathbf{a}_i^k$  und  $\mathbf{x}_i$  beziehen sich dabei nur auf einen Ausschnitt aus dem Gesamtsystem betreffend der Linearisierung der unbekanntenen Stationskoordinaten. Die Satellitenkoordinaten werden nicht geschätzt, sondern festgehalten. Andere Parameter werden zu einem späteren Zeitpunkt linearisiert. Für einen Sterntag später wird für die gleiche Station und den gleichen Satelliten eine identische Beobachtungsgleichung aufgestellt. Diese enthält das gleiche Design in  $\mathbf{a}_i^k$  und identische Antennen- und Mehrwegefehler. Eine Beobachtungsgleichung der siderischen Tagesdifferenz ergibt sich zu

$$\begin{aligned}
 \delta^{SID} l_{\Phi_i}^k &= c_0 \cdot (\delta^{SID} dt^k - \delta^{SID} dT_i) + \lambda \cdot \delta^{SID} N_i^k \\
 &- \delta^{SID} d_{Ion_i}^k + \delta^{SID} d_{Trop_i}^k + \delta^{SID} \varepsilon_i^k - v.
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

Es werden die Antennen- und für den Fall identischer Reflektorverhältnisse die Mehrwegefehler eliminiert. Die verbleibenden Terme enthalten die siderischen Differenzen der Komponenten, die sehr klein für eine kurze Basis sind (atmosphärische Fehler) bzw. korrekt modelliert werden (Uhrfehler). Dies wird entsprechend in der undifferenziert arbeitenden Software GEONAP durchgeführt (*Wübbena u.a. 1996, Seeber u.a. 1998*). In Verbindung mit Abbildung 5.12 wird

die Beobachtungsgleichung für die Doppelten Differenzen zur Verdeutlichung dargestellt, die die zweite Station  $j$  und einen zweiten Satelliten  $l$  enthält:

$$\nabla \Delta \delta^{SID} l_{\Phi_{ij}}^{kl} = \lambda \cdot \nabla \Delta \delta^{SID} N_{ij}^{kl} + \nabla \Delta \delta^{SID} \varepsilon_{ij}^{kl} - v. \quad (5.13)$$

Neben dem unerwünschten Mehrwegefehler werden durch die Tagesdifferenz auch die gesuchten Phasenzentrumsvariationen eliminiert. Um trotzdem absolute Phasenzentrumsvariationen zu bestimmen, wird der Antennenprüfling an einem der zwei Beobachtungstage rotiert und gekippt. Die zweite Antenne behält an beiden Tagen ihre Ausrichtung. Durch diese Vorgehensweise werden die Differenzen der PCV zwischen der Nullstellung  $(\alpha_0, z_0)$  des Prüflings an einem und den rotierten bzw. gekippten Stellungen  $(\alpha_0 + \Delta\alpha, z_0 + \Delta z)$  am zweiten Tag wieder als Beobachtungsgrößen eingeführt. Die PCV der zweiten Station („Referenzstation“) sind weiterhin nicht enthalten. Die linearisierte Beobachtungsgleichung der Tagesdifferenz (5.12) verändert sich zu:

$$\begin{aligned} \delta^{SID} l_{\Phi_i}^k &= c_0 \cdot (\delta^{SID} dt^k - \delta^{SID} dT_i) + \lambda \cdot \delta^{SID} N_i^k \\ &- \delta^{SID} d_{Ion_i}^k + \delta^{SID} d_{Trop_i}^k \\ &+ d_{PCV_{rcv_i}}^{(\alpha_0, z_0)k} - d_{PCV_{rcv_i}}^{(\alpha_0 + \Delta\alpha, z_0 + \Delta z)k} + \delta^{SID} \varepsilon_i^k - v. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Zur Veranschaulichung wird wieder die Beobachtungsgleichung für die Doppelten Differenzen dargestellt:

$$\begin{aligned} \nabla \Delta \delta^{SID} l_{\Phi_{ij}}^{kl} &= \lambda \cdot \nabla \Delta \delta^{SID} N_{ij}^{kl} \\ &+ \nabla \Delta d_{PCV_{rcv_{i(j)}}}^{(\alpha_0, z_0)(\alpha_0 + \Delta\alpha, z_0 + \Delta z)kl} + \nabla \Delta \delta^{SID} \varepsilon_{ij}^{kl} - v. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Der Term  $\nabla \Delta d_{PCV_{rcv_{i(j)}}}$  betrifft nur die PCV einer Antenne, des rotierten und gekippten Prüflings auf Station  $i$ . Die Beobachtungsgröße für die Bestimmung absoluter PCV ist somit die Differenz zweier Antennenorientierungen bezüglich identischer Satellitenpositionen. Die Winkel bzw. Winkeländerungen  $(\alpha_0, z_0, \Delta\alpha, \Delta z)$  sind im fixierten Antennenkoordinatensystem bekannt und definiert.

$$\Delta d_{PCV_{rcv}}^{(\alpha_0, z_0, \Delta\alpha, \Delta z)} = d_{PCV_{rcv}}^{(\alpha_0, z_0)} - d_{PCV_{rcv}}^{(\alpha_0 + \Delta\alpha, z_0 + \Delta z)} \quad (5.16)$$

Durch die Nutzung von PCV-Differenzen zwischen verschiedenen Richtungen im Antennenkoordinatensystem wird die Topographie der Phasenzentrumsvariationen beschrieben. Eine absolute Größe (Maßstabsfaktor) ist nicht zu bestimmen. Eine Festlegung wird hierfür nur durch die Ausgleichsbedingung getroffen, dass die PCV im Zenit Null sein müssen. Diese Randbedingung ist zudem erforderlich, um eine Singularität der Ausgleichung zu vermeiden. Auf diese Weise ist

trotz der Verwendung von Tages- und Orientierungsdifferenzen und der Auswertung einer kurzen Basislinie die Ableitung absoluter Phasenzentrumsvariationen möglich. Es besteht keinerlei Abhängigkeit von den PCV und Mehrwegefehlern der „Referenzantenne“.

Für die Modellierung der Beobachtungen wird eine Kugelfunktionsentwicklung von Grad  $n$  und Ordnung  $m$  verwendet:

$$d_{PCV_{rcv}}^{(\alpha, z)} = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m \alpha + B_{nm} \sin m \alpha) \cdot P_{nm}(\cos z) \quad (5.17)$$

Dabei sind  $P_{nm}$  die normalisierten zugeordneten Legendreschen Funktionen. Das Azimut  $\alpha$  und der Zenitwinkel  $z$  beschreiben die Satellitenposition im Antennensystem. Durch die Vorgehensweise werden die vollständigen PCV in Bezug auf den Drehpunkt der Messung durch die Kugelfunktion ohne vorherige Offsetbestimmung abgeleitet und können später zum Beispiel direkt auf den Referenzpunkt (ARP) der Antenne umgerechnet werden. Die Lagerung des *phase pattern* wird implizit durch die niederen Koeffizienten  $A_{0,0}$  für die Höhe und  $A_{1,0}$ ,  $B_{1,1}$  für die horizontalen Komponenten repräsentiert. Im aktuellen Verfahren werden die Offsets als separater nachfolgender Arbeitsschritt aus den berechneten PCV abgeleitet (vgl. nächste Abschnitte). Die PCV-Korrekturen können für eine vereinfachte Einführung auch für andere Softwarepakete in Tabellenform umgerechnet werden, zum Beispiel in 5 °-Schritten. Die Wahl einer Kugelfunktionsentwicklung hat sich, obwohl nur Beobachtungen und Ergebnisse für eine Halbkugel vorliegen bzw. bestimmt werden, als sinnvoll und die PCV in Anwendungen als plausibel und korrekt erwiesen.

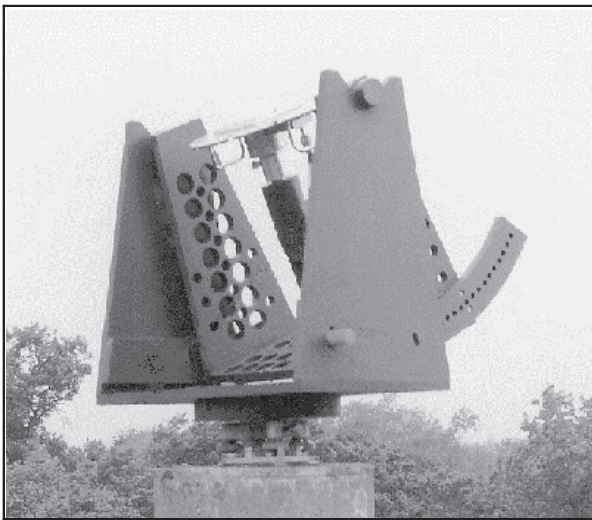


Abbildung 5.14: Verwendete Unterbau-Versionen im Post-Processing-Verfahren. Erste Eigenentwicklung (links) aus Kunststoff.

Die praktische Umsetzung des Post-Processing Verfahrens geschieht mit hochgenauen Rotationen und Kippungen des Antennenprüflings in einem möglichst unveränderbaren Punkt. Nach einem statischen Messtag werden an einem zweiten Tag die Beobachtungen in diesen gekippten Stellungen durchgeführt. Für eine gute Abdeckung der Antennen mit Beobachtungen ist ein umfangreiches und optimiertes Beobachtungsprogramm notwendig. Auf diese Weise wird der Satellit als scheinbar feste Signalquelle genutzt. Im Gegensatz zu statischen Beobachtungen wird

die Beobachtungsverteilung nicht durch die Veränderung der Satellitenkonstellation erreicht, sondern die Antenne wird durch die azimutalen Rotationen und zenitalen Kippungen abgetastet. Es kann eine homogene und dichtere Abdeckung der Antennenhemisphäre in kürzerer Zeit erreicht werden, ohne große Lücken zwischen den Satellitenspuren und Nordloch wie im statischen Fall. Es können zudem Beobachtungen nahe des Antennenhorizonts durch hochstehende Satelliten ausgeführt werden. Auf Grund der Kippungen ist eine Korrektur für den so genannten *Phase-Windup*-Effekt erforderlich (Kapitel 8).

Im Post-Processing-Verfahren wurden spezielle Unterbau-Konstruktionen verwendet, um die Antennen in einem definierten Punkt drehen zu können (Abbildung 5.14). Für die Genauigkeit der zu bestimmenden Phasenzentrumsvariationen ist eine hohe mechanische Präzision und Stabilität erforderlich. Ein erster Eigenbau wurde aus besonderem Kunststoff entwickelt, um jegliche Veränderungen des EM-Feldes der Antenne auszuschließen. Die einzelnen Winkelpositionen, horizontal in  $10^\circ$ -Schritten und vertikal  $\pm 22.5^\circ$  in  $2.5^\circ$ -Schritten, wurden aufwendig mit einem WILD Tachymeter-Messsystem kalibriert. Die Konstruktion war so ausgelegt, dass sich der Schnittpunkt von Rotations- und Kippachse möglichst präzise und stabil verhält. Ein parallel genutzter Aluminiumunterbau war wesentlich kompakter und befand sich komplett unterhalb der Antennen-Grundplatte. Für dieses Modell mit verbesserter Stabilität musste der Drehpunkt ebenfalls durch Tachymetermessungen bestimmt werden. Beide Konstruktionen weisen jeweils zwei Freiheitsgrade für die Antennendrehung auf, eine azimutale Verdrehung und die Kippung. So konnte immer nur der Zenitwinkel für eine bestimmte Marke des Prüflings verändert werden (zum Beispiel Nordmarke). Eine Rotation um die Antennenachse in gekippter Stellung war nicht möglich. Entsprechend wurde die Umrechnung der Satellitenrichtung aus dem lokalen topozentrischen System in das verdrehte Antennenkoordinatensystem umgesetzt. Die praktischen Messungen mit diesen Konstruktionen waren aufwendig und mussten manuell durchgeführt werden (Einstellung Antennenpositionen, Start-Stop Empfänger in statischen Positionen, Einführung der Winkel und Zeiten aller statischen Positionen in Auswertung etc.).

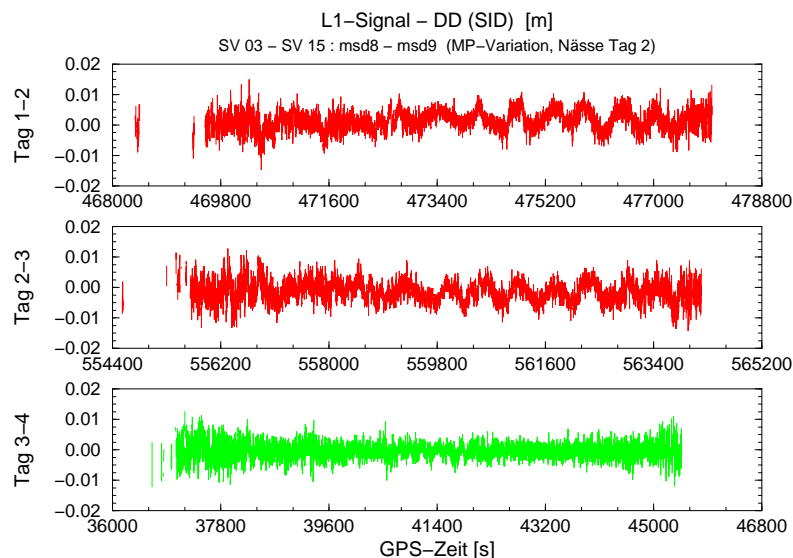


Abbildung 5.15: Geringe Veränderung der Mehrwegefehler durch unterschiedliche Reflektoreigenschaften (Nässe). Tagesdifferenzen mit Tag 2 (starker Regen, Nässe) weisen für identische Satellitenkombination MP-Perioden auf.

Kritische Aspekte dieses Verfahrens auf Basis von Tagesdifferenzen liegen in der mangelnden Au-

tomatisierung, in möglichen verbleibenden differentiellen Mehrwegefehlern zwischen den Tagen und in Mängeln der Unterbaustabilität. Die Wahl der siderischen Tageslänge  $24 \text{ h} + \delta t^{SID}$  hingegen erwies sich als unkritisch. Die Ableitung eines Mittels aus allen Satelliten aus den aktuellen Daten zweier aufeinander folgender Tage und die Anpassung dieses Wertes an die Aufzeichnungsrate war unproblematisch. Untersuchungen mit kleinen Variationen der Zeitverschiebung erbrachten keine signifikanten Veränderungen in den PCV-Korrekturen. Kritischer müssen mögliche Änderungen von Mehrwegefehlern durch unterschiedliche Reflektoreigenschaften an beiden Tagen betrachtet werden. So kann sich die Veränderung des Reflexionskoeffizienten durch Nässe auf das Mehrwegesignal auswirken (Beispiel Abbildung 5.15), bei Schnee besonders stark (Böder 2002).

Mehrwegefehler beruhend auf neu einfallenden reflektierten Signalen, die durch die Kippung empfangen werden, sind ein theoretischer Einflussfaktor. Hier kann eine feste Elevationsmaske nicht gänzlich Abhilfe schaffen, wenn die Kippung größer als diese ist. Letztlich sind jedoch immer nur einzelne Signale durch differentielle Mehrwegefehler in unterschiedlicher Größenordnung betroffen. Durch die gute Überdeckung und die Mittelung aller Ergebnisse durch die Ausgleichung einer Kugelfunktion sind die Effekte nicht so groß wie die theoretische Veränderung eines speziellen Mehrwegesignals. Ähnliches gilt für Mängel der Stabilität des Unterbaus.

Die Ergebnisse für dieses Verfahren, speziell auch für die Korrekturwirkung, erfüllten die Erwartungen (Wübbena u.a. 1996, Menge u.a. 1998). Es konnten zudem erstmalig signifikante PCV-Korrekturen für den Antennenhorizont mit einem Feldverfahren abgeleitet werden. Im Vergleich mit den verbesserten Ergebnissen der Weiterentwicklung bestätigen sich die Ergebnisse (Abschnitt 6.1).

### 5.4.2 Weiterentwicklungen - Automatisierung und Echtzeitverfahren

Das Verfahren der Absoluten Feldkalibrierung im Post-Processing zeigt einige Ansatzpunkte zur weiteren Verbesserung für die Bestimmung hochgenauer Phasenzentrumsvariationen auf, speziell hinsichtlich der Trennung von PCV und Multipath. Dazu gehören

- Weiterentwicklung Unterbau-Konstruktion (Freiheitsgrade, Präzision)
- Automatisierung des Verfahrens (Schnelligkeit, Beobachtungsüberdeckung)
- Elimination möglicher differentieller Mehrwegefehler.

Verbesserungen in allen drei Punkten sind die Grundlage für das aktuelle Verfahren der Absoluten Feldkalibrierung in Echtzeit mit einem Roboter. Die grundlegende Vorgehensweise der Nutzung von PCV-Informationen verschiedener Antennenorientierungen und der Modellierung mit einer Kugelfunktion bleibt erhalten. Die Entwicklungen für eine hochgenaue und schnelle Antennenpositionierung werden durch die Nutzung eines Roboters mit fünf Freiheitsgraden (Modulen) ermöglicht (Abbildung 5.16). Der kalibrierte Roboterarm erlaubt eine programmgesteuerte Positionierung mit Sub-Millimetergenauigkeit (Abschnitt 5.4.3). Zusätzlich zur einer horizontalen Rotation  $\Delta\alpha_a$  und einer zenitalen Kippung  $\Delta z$  ist eine Drehung um die Rotationsachse des Prüflings  $\Delta\alpha_b$  in gekippter Stellung möglich. Die maximale Kippung beträgt in Abhängigkeit der Dimension und des Einspannpunktes der Antenne mehr als  $40^\circ$ . Die Umrechnung der Satellitenrichtung  $(\alpha', z')$  im topozentrischen System in das antennenfixierte System kann zum Beispiel über Rotationsmatrizen (Bock 1998) berechnet werden:





Abbildung 5.16: Roboter mit fünf Freiheitsgraden/Modulen.

$$\mathbf{x}_{(\alpha, z)} = \mathbf{R}(\Delta\alpha_b) \cdot \mathbf{R}(\Delta z) \cdot \mathbf{R}(\Delta\alpha_a) \cdot \mathbf{x}_{(\alpha', z')} . \quad (5.18)$$

Die undifferenzierte Beobachtungsgleichung bleibt die Grundlage auch für das Echtzeitverfahren, welches in das Softwarepaket GNRT/GNNET implementiert worden ist (*Wübbena u.a. 2000b*). Das Verfahren wird weiterhin auf einer kurzen Basis und dadurch mit gleichen entfernungsabhängigen Fehlern auf beiden Stationen durchgeführt. Da keine Tagesdifferenzen mehr genutzt werden, ist das Parametermodell in (5.11) erweitert worden, um die Mehrwegefehler in Echtzeit zu eliminieren. Über die hohe Korrelation zwischen den Mehrwegefehlern in aufeinander folgenden Epochen wird je ein Multipath-Parameter pro Satellit-Empfänger-Kombination als stochastischer Prozess (z.B. *Blewitt 1998*) im Filtermodell geschätzt:

$$d_{MP_{rcv_i}}^k = f(\sigma_{MP}^2, \tau) . \quad (5.19)$$

Standardmäßig werden für die Varianz  $\sigma_{MP}^2 = 1$  cm und für die Korrelationslänge  $\tau = 60$  s gesetzt. Durch eine schnelle Änderung der Orientierung können auf diese Weise Multipath und PCV getrennt werden. Die PCV-Information wird durch unterschiedliche Orientierungen von Epoche zu Epoche wieder eingeführt, Multipath hingegen ändert sich nicht so schnell. Für die

statische „Referenzantenne“ ändern sich zudem die PCV nicht, da zwischen zwei Epochen - zum Beispiel mit dem Abstand 1 s - keine Veränderung der Satellitengeometrie auftritt.

In Erweiterung von (5.12) für den unbewegten Fall wird deutlich, dass im Gegensatz zu Tagesdifferenzen auch der Mehrdeutigkeitsterm eliminiert wird:

$$\begin{aligned} \delta^{Epoch} l_{\Phi_i}^k &= c_0 \cdot (\delta^{Epoch} dt^k - \delta^{Epoch} dT_i) + \\ &- \delta^{Epoch} d_{Ion_i}^k + \delta^{Epoch} d_{Trop_i}^k + \delta^{Epoch} \varepsilon_i^k - v. \end{aligned} \quad (5.20)$$

Die Mehrdeutigkeitslösung ist nicht mehr zwingend erforderlich. Die Wirkung der Elimination der Mehrwegefehler und die Wiedereinführung der PCV durch schnelle Orientierungsänderungen im undifferenzierten Ansatz lassen sich in Analogie anschaulich durch Dreifache Differenzen (TD) zeigen. Die Abänderung von (5.15) ergibt

$$\delta^{Epoch} \nabla \Delta l_{\Phi_{ij}}^{kl} = \delta^{Epoch} \nabla \Delta d_{PCV_{rcv}}^{(\alpha_t, z_t)(\alpha_{t+1}, z_{t+1})}{}_{i(j)}^{kl} + \delta^{Epoch} \nabla \Delta \varepsilon_{ij}^{kl} - v. \quad (5.21)$$

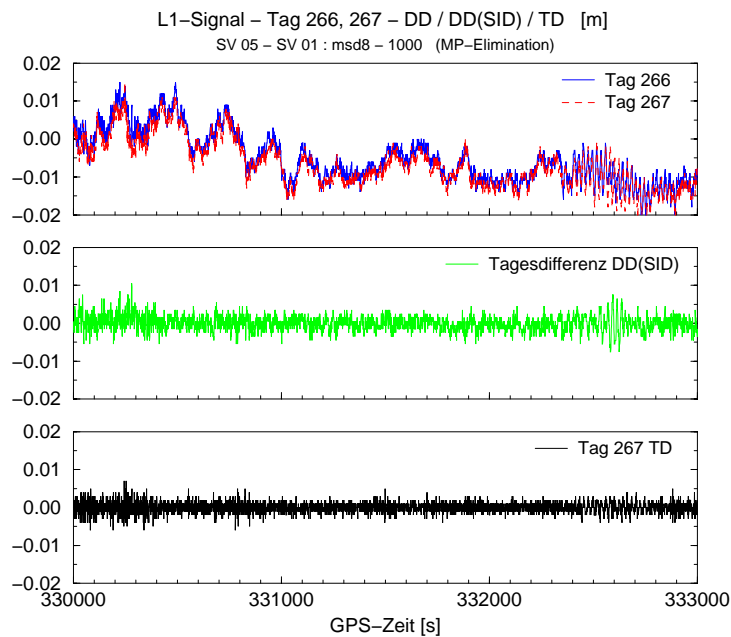


Abbildung 5.17: Wirkung Dreifacher Differenzen (TD) zur Veranschaulichung der Weiterentwicklung zur Elimination von Mehrwegefehlern in Echtzeit.

Dreifache Differenzen - Epochendifferenzen zwischen Doppelten Differenzen - sind bekanntlicherweise nicht nur frei von Uhr- und Atmosphärenfehlern, sondern weiterhin auch vom Mehrdeutigkeitsterm und von Mehrwegefehlern. Voraussetzung ist ein kurzer Epochenabstand. Deutlich ist der Effekt in Abbildung 5.17 zu erkennen. In Erweiterung zu Abbildung 5.12 zeigt sich die

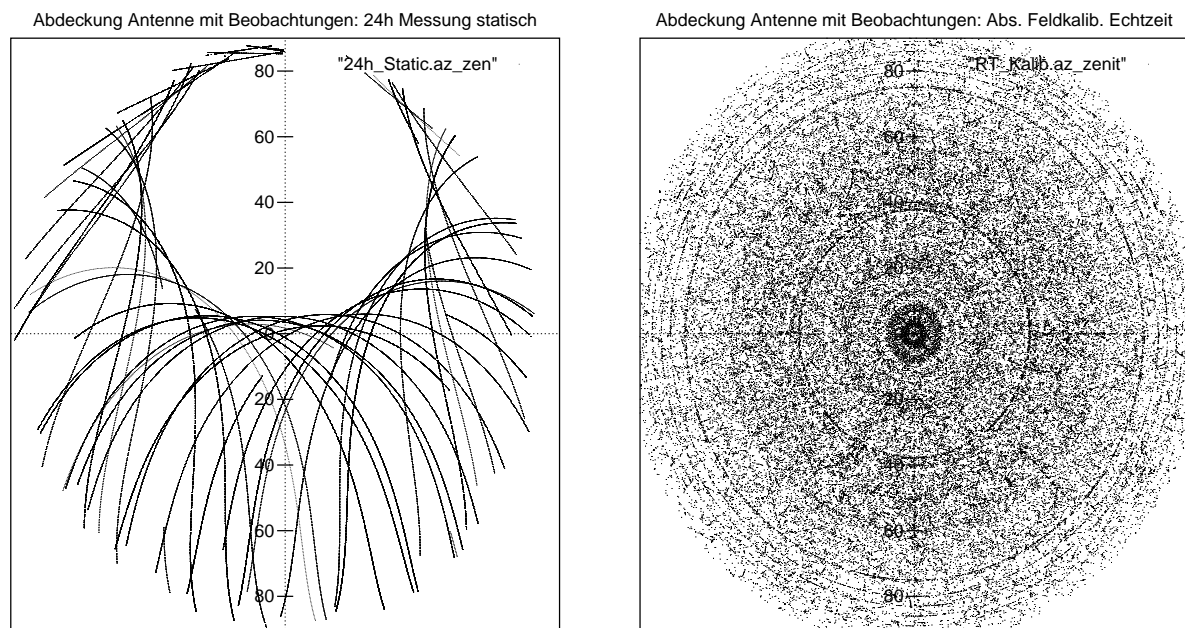


Abbildung 5.18: Abdeckung der Antennenhemisphäre mit Beobachtungen bei statischer 24h-Messung (links) und absoluter Feldkalibrierung in Echtzeit (rechts).

Elimination von typischen Mehrwegeperioden nicht nur in den siderischen Differenzen, sondern auch in den Kurzzeitdifferenzen (TD).

Neben der Mehrwegeelimination ist eine hohe Beobachtungsdichte über die gesamte Antennenhemisphäre von großer Bedeutung für präzise und hochauflösende PCV-Ergebnisse. Dies kann mit der Automatisierung durch den Roboter erreicht werden. In Abhängigkeit von der aktuellen Satellitenkonstellation wird jeweils ein optimiertes Messprogramm von 6000-8000 verschiedenen Antennenpositionen gefahren.

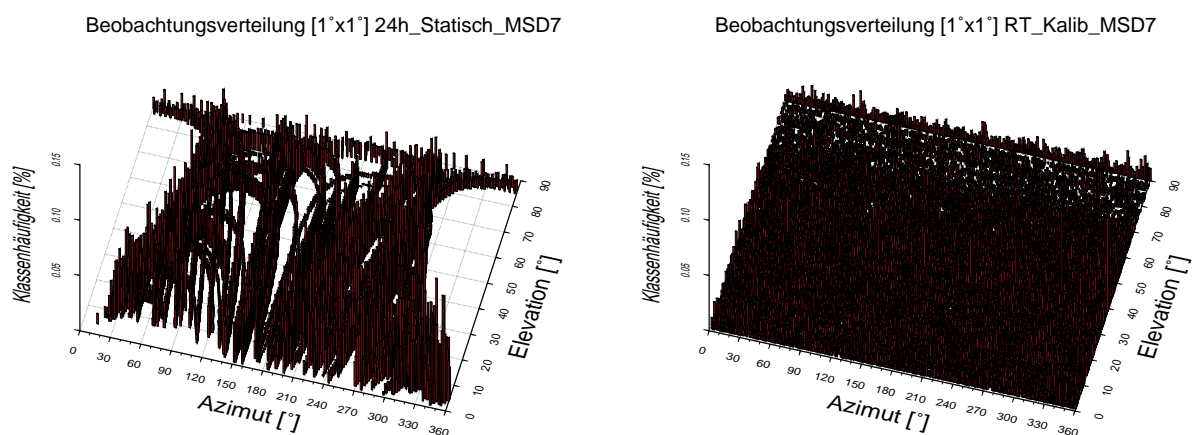


Abbildung 5.19: Abdeckung der Antennenhemisphäre mit Beobachtungen. Klassenhäufigkeiten bei statischer 24h-Messung (links) und absoluter Feldkalibrierung in Echtzeit (rechts). Dabei wurden Elevations-Azimutklassen der Größe  $1^\circ \times 1^\circ$  erzeugt.

Die Optimierung berücksichtigt die Überdeckung der Beobachtungen im Antennenkoordinatensystem, die Beobachtungszeit und die zu erwartende PCV-Genauigkeit, da in Echtzeit eine Ku-

gelfunktion ausgeglichen und aufdatiert wird. Abbildung 5.18 zeigt die Unterschiede der Beobachtungsverteilung anhand einer statischen 24h-Messung und einem Ergebnis des Roboterverfahrens für eine identische Station. Es ist rein qualitativ die optimierte Überdeckung bei der Absoluten Feldkalibrierung erkennbar. Zur Quantifizierung ist die Bildung von Klassenhäufigkeiten möglich. Am aussagefähigsten ist dafür der dreidimensionale Fall, da hier keine Mittelung über Elevations- bzw. Azimutbereiche durchgeführt werden muss. Neben der homogenen gleichmäßigen Verteilung bei den Robotermessungen sind die Beobachtungslöcher der statischen Messung (Beispiel für Relativkalibrierung) in Abbildung 5.19 zu erkennen. Auf Grund der 24 h-Messung sind teilweise wesentlich mehr Beobachtungen in den besetzten Klassen vorhanden. Diese tragen wegen der unveränderten Geometrie aber nicht zu einer Verbesserung bei. Die dichte Beobachtungsverteilung trotz kurzen Messzeiten bei der Absoluten Feldkalibrierung hingegen resultiert aus der Optimierung der Roboterausrichtung anhand der jeweils aktuellen Satellitenkonstellation.

Ein weiterer Punkt zur Stabilisierung der PCV-Ergebnisse und zur Vermeidung von möglichen Multipath-Resteffekten durch die Kippung ist die Verwendung einer dynamischen Elevationsmaske (Abbildung 5.20). Diese wird individuell in Abhängigkeit von Azimut und Kippung der Antenne und dem Azimut der Satelliten eingestellt. Eine feste Elevationsmaske liegt beim Echtzeitverfahren gewöhnlich bei  $18^\circ$ . Zur Vermeidung eines einmal am Boden reflektierten Mehrwegesignals muss bei der Antennenkippung das erzeugende direkte Signal ausgeschlossen werden. Dazu wird für einen Satelliten in Kipprichtung die Elevationsmaske auf etwas größer als der Kippwinkel verändert, um das Eintreffen des Umwegesignals im oder oberhalb des Antennenhorizonts zu vermeiden.

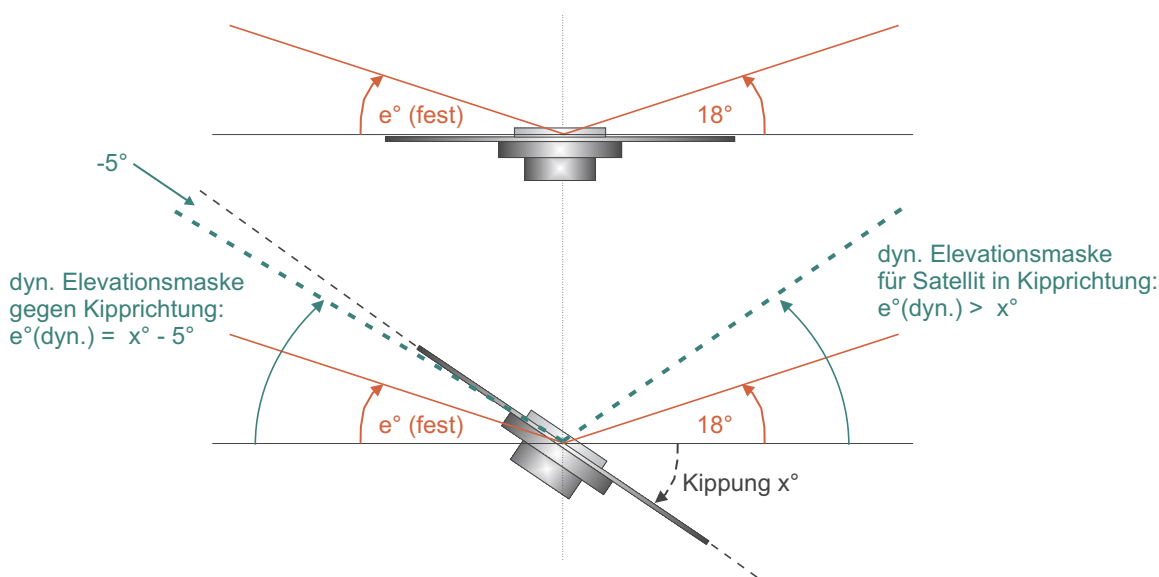


Abbildung 5.20: Prinzip der dynamischen Elevationsmaske der Absoluten Feldkalibrierung (Roboter).

Auf der hochgestellten Seite wird die Elevationsmaske auf  $-5^\circ$  eingestellt. Diese negative Elevationsmaske mit ihrem Maximum für einen Satelliten  $180^\circ$  entgegen der Kipprichtung stabilisiert die Kugelfunktionslösung im Horizont. Ein Nachteil der Kugelfunktionsentwicklung ist, dass nur Beobachtungen für die obere Hemisphäre vorhanden sind. Zudem wird im Zenit die Bedingung  $PCV^z = 0$  vorgegeben, sodass sich speziell am Antennenhorizont sämtliche Restunsicherheiten widerspiegeln. Ein Signal unterhalb der Grundplatte kann nur ein gebeugtes Signal sein. Er-

gebnisse aus Kammerkalibrierungen (Abbildung 5.10) zeigen, dass trotzdem ein durchgehendes Signal empfangen werden kann. Diese Stetigkeit ist Voraussetzung für die Nutzung als Eingangsbeobachtung in der Kugelfunktionsentwicklung. Abbildung 5.21 zeigt die Standardabweichungen einer PCV-Kalibrierung ohne und mit negativer Elevationsmaske. Die PCV unterhalb der Grundplatte stützen klar die Horizontgenauigkeit. Prinzipiell ist sogar eine Nutzung dieser Werte für gekippte Anwendungen denkbar (*Wübbena und Schmitz 2003*).

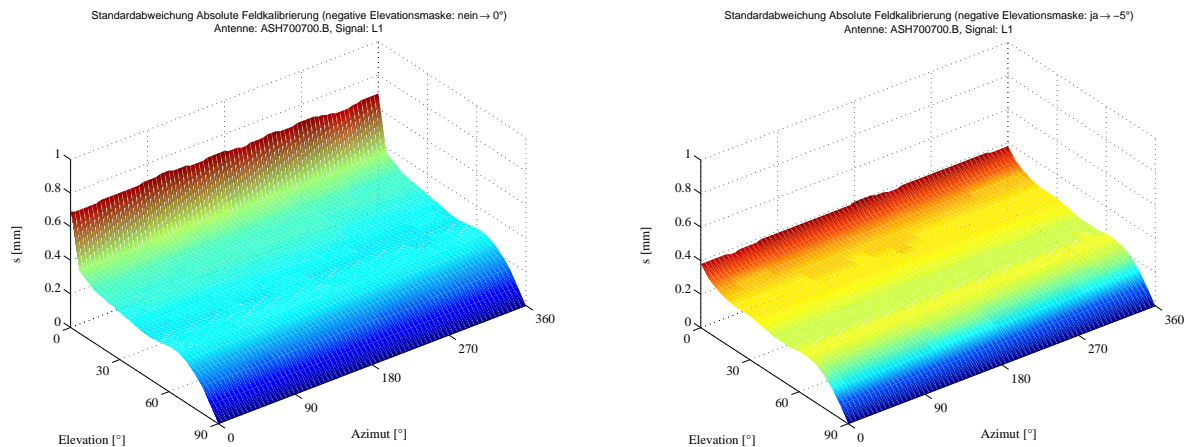


Abbildung 5.21: Veränderung Elevationsmaske (im Antennensystem) zur Nutzung von Satellensignalen unterhalb der Grundplatte. Beispiel ASHTECH Marine Antenne (ASH700700.B). Linke Abbildung zeigt Standardabweichung einer Kalibrierung (4 Einzelkalibrierungen) der L1-PCV bei Nutzung aller Beobachtungen bis zum Horizont im Antennensystem. Rechts werden Beobachtungen bis  $-5^\circ$  in die Auswertung einbezogen.

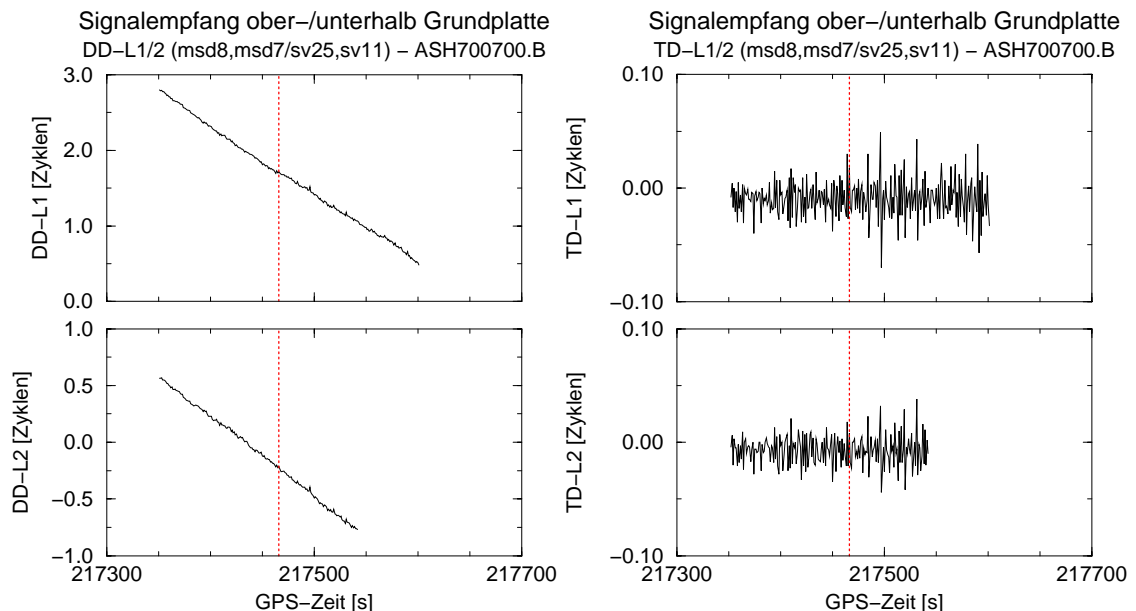


Abbildung 5.22: Stetigkeitstest. Empfang von Daten oberhalb und unterhalb der Grundplatte. Beispiel ASHTECH Marine Antenne (ASH700700.B). DD und TD der  $L_1$  und  $L_2$ -Residuen beim Durchgang durch den Antennenhorizont (gestrichelte Linie).

Die Stetigkeit der Signale beim Durchgang durch den Antennenhorizont ist für die eingesetzten Modelle überprüft worden. Dies kann mit dem Roboter durchgeführt werden. Nach der Auswahl eines Satelliten wird die Antenne auf dessen Azimut eingestellt. Anschließend wird sie so gekippt, dass ein Signal von oberhalb der Grundplatte bis unterhalb empfangen wird. In Abbildung 5.22 sind beispielhaft die Residuen (DD, TD) für eine ASHTECH Marine Antenne (ASH700700.B) beim Durchgang dargestellt. Es ergibt sich ein stetiger Verlauf. Bei den meisten Antennen-Empfängerkombinationen reißt das schwächere  $L_2$ -Signal früher ab. Bis  $-5^\circ$  ist für beide Signale in der Vielzahl von durchgeführten Feldmessungen immer ein Signalempfang möglich gewesen.

Durch die schnellen Bewegungen und die dynamische Elevationsmaske ist das Verfahren erheblich verbessert worden, wie die Wiederholbarkeit unabhängiger Kalibrierungen zeigen (Abschnitt 6.1). Durch die Nutzung von hochstehenden Satelliten wird eine wesentliche Verbesserung im Rauschniveau erreicht. Direkte Mehrwegefehler durch einmal reflektierte Umwegsignale sind praktisch nicht vorhanden. Eine Trennung von PCV und Multipath gelingt. Die Ergebnisse sind antennen-spezifische (*inherent*) PCV, die unabhängig vom eingesetzten Ort gültig und für jegliche Nutzung dieser Antenne geeignet sind. In der Literatur wird teilweise die Auffassung vertreten, dass die PCV und die Stationseffekte gekoppelt und nicht zu trennen sind (*Elósegi u.a. 1995*), oder sogar die Funktionalität der Absoluten Feldkalibrierung auf Grund einer potentiell möglichen Kopplung der Antenne mit dem Roboter angezweifelt (*Park u.a. 2002*). Auch in älteren Beiträgen wird zum Teil von einer Untrennbarkeit ausgegangen, gleichzeitig aber die Unabhängigkeit der originalen PCV von der Umgebung betont (*Tranquilla 1986, Georgiadou und Kleusberg 1988*). Prinzipiell ist diese Problematik eine Definitionsfrage. Die sehr gute Wiederholbarkeit diverser Kalibrierungsszenarios und die anschließenden Tests in realen Messungen unterlegen eine bestmögliche und funktionierende Trennung von PCV und Mehrwegeeffekten und die Unabhängigkeit vom Roboter. Tatsächlich bewirken Veränderungen im Nahfeld der Antenne auch veränderte Phasenzentrumsvariationen, wie zum Beispiel der Einfluss einer Grundplatte (Kapitel 7). Diese direkt durch die Antenne bedingten Effekte werden in der Absoluten Feldkalibrierung mitbestimmt. Diffraktionseffekte und andere Einflüsse durch die Messumgebung wie durch einen Pfeiler (*scattering*) werden durch die Absolute Feldkalibrierung ausgeschlossen bzw. können nachweislich nur einen Resteinfluss untergeordneter Größenordnung haben. Diese restlichen Stationsfehler, die zusätzlich zu den antennenspezifischen PCV auftreten, sind von der individuellen Station und dem Aufbau abhängig. Sie können in einem zweiten Schritt, einer Erweiterung des Roboterverfahrens zur Kalibrierung von Multipath, bestimmt werden (Kapitel 3.2.2).

Theoretische differentielle Multipath-Restfehler sind durch die Kippung der Antenne gegeben. Hierdurch könnten reflektierte Signale an anderer Stelle der Antenne mit anderen PCV eintreffen. Daraus ergibt sich eine minimal unterschiedliche Umweglänge und somit ein minimal veränderter Mehrwegefehler zwischen zwei Messepochen. Theoretisch kann sich zudem ein Mehrwegefehler nicht nur in der Amplitude sondern auch in der Phasenlage ändern, weil sich durch die Kippung der *gain* und somit der Reflexionskoeffizient ändern kann. Praktisch zeigen sich diese möglichen Fehler in der Absoluten Feldkalibrierung nicht bzw. müssen eine Größenordnung geringer als die PCV-Genauigkeiten sein, wie die Ergebnisse nachweisen. Dies ist in erster Linie durch die dynamische Elevationsmaske begründet. Zudem werden ein Großteil der Beobachtungen durch Rotation um die (gekippte) Antennenachse gewonnen, wobei azimutal kaum Änderungen im *gain* zu erwarten sind. Weiterhin werden Signale eines Satelliten in unterschiedlichen Richtungen im Antennensystem erfasst. Auf Grund dieser spezifischen Merkmale sind differentielle Multipath-Restfehler praktisch ausgeschlossen.

### 5.4.3 Anmerkungen zur Nutzung eines Roboters

Neben der bereits angesprochenen Möglichkeit für schnelle Drehungen und Kippungen zur Trennung von Multipath und PCV ist eine weitere wichtige Eigenschaft die hohe Genauigkeit des Roboters zur wiederholten Einstellung des Drehpunktes. Die Antenne muss exakt um einen identischen Punkt bewegt werden, der die Referenz für die abgeleiteten PCV bildet. Zielvorstellung ist eine um eine Größenordnung höhere Genauigkeit für die Einstellung dieses Punktes als die der abgeleiteten PCV. Diese sollte im Bereich von Zehntelmillimetern liegen, um signifikante systematische Verfälschungen der PCV auszuschließen.

Der Roboterarm (Abbildung 5.16) aus Komponenten des Berliner Herstellers AMTEC ist modular aufgebaut und individuell für die Nutzung zu Kalibrierungszwecken zusammengestellt worden. Die fünf Einzelmodule verschiedener Größe mit Kantenlängen von 110, 90 und 70 mm bestehen jeweils aus zwei Quadraten, die sich um eine gemeinsame Achse drehen. Über Inkrementalgeber können Positionen (Winkel) laut Hersteller auf  $\pm 0.02^\circ$  Genauigkeit aufgelöst und wiederholt angefahren werden. Mit einem Tachymetermesssystem (TMS) von WILD wurde das Gesamtsystem überprüft. Dazu wurde eine Messspitze beobachtet, die über die mechanischen Sollmaße absolut positioniert wurde. Das TMS bestimmt die Positionen über Vorwärtsschnitte auf kurze Entfernungen mit einer Genauigkeit im Bereich von 0.1 bis 0.2 mm. In Abhängigkeit von der eingestellten Position traten Abweichungen bis maximal 1 - 3 mm auf. Diese für Kalibrierungszwecke nicht zu akzeptierende Größenordnung ergibt sich aus der Summe minimaler Einzelfehler des gesamten Systems, zum Beispiel durch die Nullstellungen der Module, durch die mechanische Montierung und durch Lasteffekte. Normal muss die Stehachse des unteren Moduls mit der Stehachse des oberen Moduls zusammenfallen. Ebenso müssen die Drehachsen der drei Mittelmodule gleich ausgerichtet und senkrecht zur Stehachse liegen. Auf Grund der Fehler musste eine hochgenaue Kalibrierung des Roboters selbst entwickelt werden, deren Ergebnisse in der Feldmessung angebracht bzw. rechnerisch korrigiert werden müssen (Abbildung 5.23).

Anfänglich wurden Kreise, Ebenen etc. per Hand mit dem Auswertesystem des Wild-TMS ausgeglichen und anschließend vektoriell Roboterkalibrierungselemente berechnet. Dies waren zunächst nur Winkeloffsets der Module (Nullstellung) und die Armlängen zwischen Modulmittelpunkten. Diese Parameter können direkt zur Verbesserung der Positionierung des Roboterarms angebracht werden. Dazu wurden die bestimmten Armlängen zur Positionsberechnung eingeführt und die Winkeloffsets in der Steuerung nachgestellt. Zur Vermeidung des hohen Aufwandes der manuellen Berechnungen wurde ein Kalibrierungsprogramm entwickelt, welches direkt die Ergebnisse der TMS-Beobachtungen (Datenfluss) zur Berechnung der Parameter nutzt. Es erfolgte eine Erweiterung um zusätzliche Unbekannte, um das funktionale Modell möglichst nahe an die realen Effekte und Fehler des Systems anzupassen und eine weitere Genauigkeitssteigerung zu erreichen.

In einem ersten Schritt wurden Lastfallkoeffizienten für die drei mittleren verkippbaren Module eingeführt, da sich in den TMS-Messungen Positionsveränderungen durch verschiedene Gewichte in Abhängigkeit der Position ergaben. Die Lastfallkoeffizienten rechnen die bestimmten Drehmomente für jedes Modul in Winkelbeträge um. Als Ergebnis dieses Schrittes verbesserte sich die Standardabweichung a-posteriori als Indikator für ein passendes Modell um 40% (*Leistner 2000*). In einer letzten Erweiterung wurden - neben der Winkeleinstellung und den Fehlern der normalen Drehachse - bestimmte Schief lagen der Modulachsen zugelassen. Zusätzlich wurden bei der Berechnung der last- und positionsabhängigen Drehmomente die Eigenlast des Roboterarmes berücksichtigt.

Für die Ausgleichung der TMS-Beobachtungen  $\mathbf{X}_{P(TMS)}$  der auf dem Roboter montierten Messspitze ergibt sich das folgende vereinfachte funktionale Modell. Die komplette Gleichung wird an

dieser Stelle aus Gründen der Übersichtlichkeit in einzelne Abschnitte aufgeteilt. Dabei werden die Koordinaten der Messspitze ausgehend vom oberen Modulkoordinatensystem in das jeweils darunter liegende System transformiert, bis das TMS-Koordinatensystem erreicht ist.

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}_{M4} = \begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ L_{45} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_{M5 \rightarrow M4} \cdot \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}_{M5} \quad (5.22)$$

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}_{M3} = \begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ L_{34} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_{M4 \rightarrow M3} \cdot \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}_{M4} \quad (5.23)$$

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}_{M2} = \begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ L_{23} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_{M3 \rightarrow M2} \cdot \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}_{M3} \quad (5.24)$$

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}_{M1} = \begin{pmatrix} dX_{M2} \\ dY_{M2} \\ dZ_{M2} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_{M2 \rightarrow M1} \cdot \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}_{M2} \quad (5.25)$$

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}_{TMS} = \begin{pmatrix} X_{M1} \\ Y_{M1} \\ Z_{M1} \end{pmatrix}_{TMS} + \mathbf{R}_{M1 \rightarrow TMS} \cdot \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix}_{M1} \quad (5.26)$$

Die auszugleichenden Parameter in (5.22) sind:

- $\mathbf{X}_{M1(TMS)}$  ... Standort Roboter im TMS-Koordinatensystem
- ... (äußere Orientierung)
- $dX_{M2(M1)}, dY_{M2(M1)}$  ... horizontaler Shift zwischen unteren Modulen
- ... (konstruktionsbedingt zugelassen)
- $L_{23}, L_{34}, L_{45}$  ... Armlängen

Weitere Unbekannte verbergen sich in den Drehmatrizen  $\mathbf{R}_{A \rightarrow B}$ , in denen die tatsächlichen Winkeleinstellungen und entsprechende Korrekturparameter der Module genutzt werden:

- $o_{M1}$  ... Orientierungsunbekannte, Ausrichtung der Aufstellung
- ... im TMS-Koordinatensystem (äußere Orientierung)
- $O_{M2}, O_{M3}, O_{M4}$  ... Winkeloffsets (positiv in Moduldrehrichtung)
- $k_{M2}, k_{M3}, k_{M4}$  ... Lastfallkoeffizienten (Umrechnung des aktuellen
- ... Drehmomentes in Winkelkorrektion)



Bei der Aufstellung des Roboterarmes für seine eigene Kalibrierung und beim späteren Feldeinsatz wird die Horizontierung hochpräzise mit einem Feinnivellier vorgenommen. Die Bestimmung zusätzlicher Parameter in der Ausgleichung ist nicht möglich (singuläres System), zudem ändern sich die Werte mit erneuter Aufstellung im Feld. Die Einführung vorab bestimmter Werte haben sich auf Grund der Präzision der Aufstellung und des hohen Aufwandes als nicht notwendig erwiesen. Neben der Horizontierung ist im Feldeinsatz eine exakte Orientierung erforderlich. Die mit GPS in einem iterativen Prozess aus zwei Lagen bestimmte Nordrichtung wird als Orientierungsunbekannte  $\phi_{M1}$  eingeführt. Es verbleiben als weitere Parameter in den Drehmatrizen  $\mathbf{R}_{A \rightarrow B}$  - neben den Drehungen um die y-Achse der drei Mittelmodule (Winkeleinstellungen) - die zugelassenen Verdrehungen der Modulkoordinatensysteme:

- $\omega_{M2}$  ... Drehung um x-Achse Modul 2
- $\omega_{M3}, \phi_{M3}$  ... Drehung um x- und z-Achse Modul 3
- $\omega_{M4}, \phi_{M4}$  ... Drehung um x- und z-Achse Modul 4

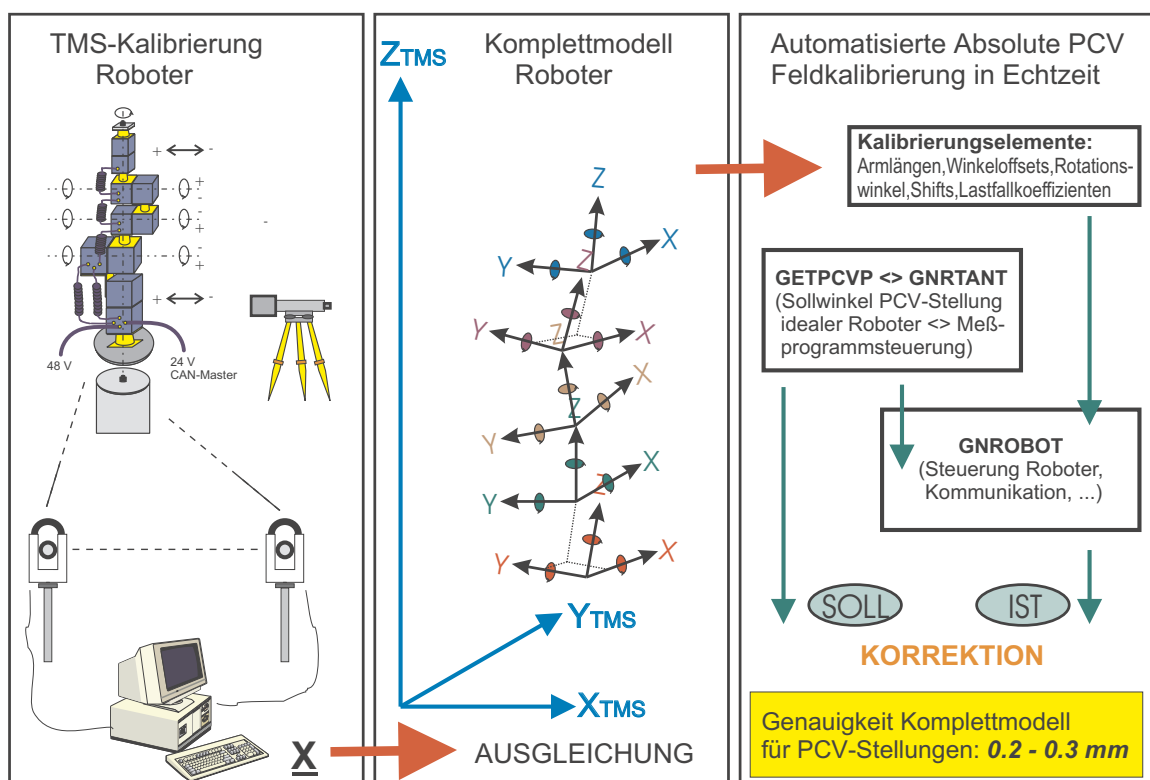


Abbildung 5.23: Kalibrierung Roboter und Übernahme in Feldmessung. Softwaremodule GETPCVP (Berechnung Einstellwinkel der Module), GNRTANT (Berechnung Messprogramm) und GNROBOT (Steuerung Roboterarm).

Zur Vermeidung eines singulären Ausgleichungssystems können Shifts und Drehungen nicht für jedes Modulsystem bestimmt werden, da sich sonst lineare Abhängigkeiten zwischen den Unbekannten herausbilden und der Fall eines Rangdefekts eintritt (Niemeier 2002). Die getroffene

Auswahl (Tabelle 5.3) hat sich auch im Zusammenhang mit mechanischen Gegebenheiten als zweckmäßig erwiesen. Beispielsweise können die Lage-Shifts zwischen den beiden unteren Modulen die an dieser Stelle auf Grund der mechanischen Konstruktion möglichen Fehler aufnehmen. Weitere Maße gehen als Konstanten in die Ausgleichung ein. Dazu gehören u.a. die jeweiligen Drehmomente der drei Mittelmodule als Funktion der originalen Winkeleinstellungen, das hochgenau bekannte Maß  $dZ$  zwischen den beiden unteren Modulen und die Koordinate der Messspitze im oberen Modulsystem (hochgenaue Zentrierung, bekanntes Längenmaß).

Die Kalibrierung des Roboterarms wird in umfangreichen TMS-Messungen mit mehreren hundert Positionen und verschiedenen Gewichten durchgeführt. Unabhängige Vergleiche von nicht für die Kalibrierung benutzten TMS-Beobachtungen mit berechneten Sollpositionen ergeben eine Genauigkeit der korrigierten Position von 0.2 - 0.3 mm. Dies ist ausreichend für die angestrebten PCV-Genauigkeiten. Die Armlängen werden für die Berechnung der Sollposition eingeführt. Die Winkelverbesserungen (Offsets, Lastfallkoeffizienten  $\cdot$  Drehmoment) werden ebenso berücksichtigt. Die nicht direkt am Arm zu korrigierenden Parameter, die Translationen und die verbleibenden Rotationen der Modulkoordinatensysteme, werden während der Antennenkalibrierung rechnerisch als zu korrigierende Zentrierungselemente berücksichtigt.

Tabelle 5.3: Kalibrierungsergebnisse eines Roboterarmes. Ausgegliche Unbekannte.

Roboterkalibrierung - Ausgegliche Parameter und ihre Standardabweichungen				
Anzahl beobachteter Punkte mit TMS: 436				
Parameter			Standardabweichung	
$X_{M1}$	2650.76	mm	0.009	mm
$Y_{M1}$	1598.64	mm	0.009	mm
$Z_{M1}$	-28.21	mm	0.026	mm
$dX_{M2}$	0.35	mm	0.018	mm
$dY_{M2}$	0.70	mm	0.030	mm
$L_{23}$	200.08	mm	0.019	mm
$L_{34}$	199.81	mm	0.017	mm
$L_{45}$	160.17	mm	0.019	mm
$o_{M1}$	201.602	°	0.0018	°
$O_{M2}$	-0.505	°	0.0034	°
$O_{M3}$	-0.165	°	0.0052	°
$O_{M4}$	-0.863	°	0.0040	°
$k_{M2}$	0.004	° $\cdot$ s <sup>2</sup> /kg $\cdot$ m <sup>2</sup>	0.0001	° $\cdot$ s <sup>2</sup> /kg $\cdot$ m <sup>2</sup>
$k_{M3}$	0.004	° $\cdot$ s <sup>2</sup> /kg $\cdot$ m <sup>2</sup>	0.0002	° $\cdot$ s <sup>2</sup> /kg $\cdot$ m <sup>2</sup>
$k_{M4}$	0.002	° $\cdot$ s <sup>2</sup> /kg $\cdot$ m <sup>2</sup>	0.0006	° $\cdot$ s <sup>2</sup> /kg $\cdot$ m <sup>2</sup>
$\omega_{M2}$	-0.002	°	0.0028	°
$\omega_{M3}$	-0.053	°	0.0020	°
$\phi_{M3}$	0.023	°	0.0013	°
$\omega_{M4}$	-0.092	°	0.0023	°
$\phi_{M4}$	-0.029	°	0.0018	°

Neukalibrierungen haben gezeigt, dass sich alle Parameter wiederholt signifikant bestimmen lassen. Dies bestätigt sich auch in Vergleichen der durchaus unterschiedlichen Kalibrierungsparameter der zwei vorhandenen Roboterarme. Kleinere Veränderungen für bestimmte Parameter zeigten sich nach Reparaturen, bei denen der Arm demontiert werden musste.

Die Genauigkeit der bestimmten Kalibrierungsparameter werden nicht nur durch die unabhängigen TMS-Messungen, sondern auch in den GPS-Feldmessungen zur PCV-Bestimmung bestätigt

(Abschnitt 6.1). Die vielen unterschiedlichen Messprogramme mit verschiedenen Robotern zeigen zudem, dass der Roboter selbst auch keinen bzw. maximal in der Größenordnung des Rauschens Einfluss auf die Phasenzentrumsvariationen der eingespannten Antenne hat. Spezielle Kalibrierungsmessungen, zum Beispiel für kleine Roverantennen, mit unterschiedlicher Einspannung in verschiedenen Abständen von der Roboterspitze (Dezimetervariationen) ergeben keine signifikanten Unterschiede.

## Kapitel 6

# Aspekte und Vergleiche verschiedener Kalibrierungsarten

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet das entwickelte Verfahren der absoluten Feldkalibrierung (Entwicklungen, Methodik, Genauigkeiten etc.). Dessen hochgenauen Ergebnisse bilden die Grundlage für Vergleiche mit anderen Verfahren, Untersuchungen der PCV verschiedener Antennen und die Auswirkung von PCV in verschiedenen Anwendungen in den Folgekapiteln. Aus diesem Grund werden im Folgenden in Fortsetzung von Abschnitt 5.4 detaillierte Untersuchungen zum Genauigkeitsniveau dieses Verfahrens vorgestellt. Anschließend wird die grundsätzliche Vorgehensweise zur Umrechnung zwischen verschiedenen PCV-Niveaus und resultierende Probleme dargestellt (u.a. Nullantenne). Den Abschluss des Kapitels bilden Vergleiche zwischen Ergebnissen verschiedener Kalibrierungsmethoden (Feld- und Kammverfahren).

### 6.1 Zur Genauigkeit der absoluten Feldkalibrierung

Zur Ableitung der Genauigkeit der Absoluten Feldkalibrierung stehen umfangreiche PCV-Ergebnisse einer Vielzahl von Antennen aus unterschiedlichen Messungen mehrerer Jahre zur Verfügung. Verschiedene Beispiele zeigen in diesem Abschnitt speziell die äußere Genauigkeit, die Wiederholbarkeit der PCV aus unabhängigen Messungen. Zur Ableitung der PCV werden dabei immer die Koeffizienten der Kugelfunktionsentwicklungen bis Grad  $n = 8$  und Ordnung  $m = 5$  gewählt. Empirische Untersuchungen bezüglich Größenordnungen und Signifikanz der Koeffizienten und zugehöriger Standardabweichungen, der PCV und zugehöriger Standardabweichungen und der PCV-Differenzen verschiedener Modellierungen (z.B. Menge u.a. 1998, Menge und Seiber 2000, Wübbena u.a. 2000b) bestätigen, dass diese Wahl allgemein für alle Antennentypen genutzt werden kann. Teilweise sind die Unterschiede der Ergebnisse zwischen verschiedenen Entwicklungen ( $\Delta n, m = 1, 2 \dots$ ) nur sehr gering. Wesentlich höhere Auflösungen als die genannte sind, wie die Phasenzentrumsvariationen auch aus anderen Modellierungen zeigen, nicht notwendig und praktisch nicht sinnvoll. Zudem sollte für die Filteralgorithmen der Echtzeitkalibrierung möglichst sparsam mit den Ressourcen an Speicherplatz umgegangen werden. In vielen Fällen zeigen die elevationsabhängigen PCV größere Variationen. Weiterhin werden nur PCV für die obere Halbkugel mit den Entwicklungen abgeleitet (Elevationswinkel 0 bis 90 °). Somit ist die Nutzung einer höheren Auflösung in dieser Richtung ( $n > m$ ) sinnvoll.

Als Genauigkeit der Absoluten Feldkalibrierung in Echtzeit mit Roboter kann die innere und die

äußere Genauigkeit betrachtet werden. Die Standardabweichung a-posteriori der ausgeglichenen PCV ( $1 \sigma$ ) liegt - als Mittel der am IfE vorliegenden Kalibrierungen - im Bereich von

$$s = 0.2 - 0.3 \text{ mm.}$$

Die Ergebnisse für die inneren Genauigkeiten sind azimuthal sehr homogen und innerhalb der o.g. Größenordnung. Sie sind unabhängig von der Ausprägung vorhandener azimuthaler PCV. Zum Horizont fallen sie auf etwa  $s = 0.4$  mm ab (Abbildung 5.21). Dies ist in den nur für die obere Hemisphäre vorhandenen Beobachtungen (inkl. negative Elevationsmaske) und der Modellierung durch eine Kugelfunktion zu begründen. Teilweise weisen die Antennen zudem schlechtere Empfangseigenschaften in Horizontnähe auf. Weiterhin reflektiert der Horizont durch die Zenitbedingung  $PCV^z = 0$  auch die Genauigkeit der Höhenkomponente.

Ergebnisse für die Wiederholbarkeit (vgl. nächste Seiten) bestätigen die  $1 \sigma$ -Standardabweichungen der Ausgleichung, welche vor allem durch das repräsentative Modell und die Anzahl der Beobachtungen begründet sind. Die aus den Differenzen unabhängiger PCV-Ergebnisse abgeleiteten Genauigkeiten - wieder als Mittel der am IfE vorliegenden Kalibrierungen - liegen für den Elevationsbereich von  $90 - 10^\circ$  im Bereich von

$$s = 0.5 \text{ mm.}$$

Speziell für  $L_1$  treten teilweise bessere Genauigkeiten auf. Die Wiederholbarkeit für  $L_2$  fällt etwas ab. Standardabweichungen für den gesamten Elevationsbereich bis zum Horizont liegen nur geringfügig schlechter. Es können in Horizontnähe aber Differenzen zwischen zwei Kalibrierungen - partiell für einzelne Bereiche - von  $\pm 1$  mm und teilweise auch größer auftreten. Dies kann wie der Abfall bei der inneren Genauigkeit begründet werden. Vor allem die schlechteren Empfangseigenschaften der Antenne bei  $0^\circ$  Elevation in Verbindung mit einer hochdynamischen Anwendung wie dieser ergeben die Möglichkeit, dass vereinzelt Beobachtungen ausfallen. Spezielle Untersuchungen zur Wiederholbarkeit werden im weiteren Verlauf dieses Abschnittes vorgestellt.

Vorab werden an dieser Stelle Ergebnisse des aktuellen Verfahrens den ersten Ergebnissen der älteren Absoluten Feldkalibrierung (Bildung von Tagesdifferenzen) gegenübergestellt. Dies dokumentiert vor allem die Genauigkeitssteigerung des Verfahrens durch verschiedene Entwicklungen. Zuerst werden zwei der ersten manuellen Kalibrierungen mit dem synthetischen Unterbau für die Ashtech Geodetic II Antenne (ASH700228D) mit den hochgenauen Ergebnissen der Echtzeitkalibrierung mit Roboter als Referenz verglichen (Abbildung 6.1). Der Tag mit statischen Beobachtungen und der Tag mit per Hand durchgeführtem Messprogramm (Rotationen und Kippungen) wiesen dabei beide identische trockene Umgebungsverhältnisse auf. Die bewegten Beobachtungen wurden am Abend durchgeführt, um mögliche Temperaturveränderungen durch zum Beispiel starke Sonneneinstrahlung zu verhindern. Es wurden Rotationen in verschiedenen Kippstellungen und Kippungen in verschiedenen Azimutpositionen durchgeführt. Pro Position wurden zwei Minuten Daten aufgezeichnet. Eine Elevationsmaske von  $0^\circ$  wurde bei der Beobachtung und bei der Auswertung im Post-Processing genutzt. Eine Angleichung an die  $18^\circ$  des Echtzeitverfahrens war nicht möglich, da für diesen Fall nicht genug Beobachtungen in der Ausgleichung vorhanden gewesen wären. Für die Winkeleinstellungen des Unterbaus wurden die Kalibrierungsergebnisse als Soll eingeführt.

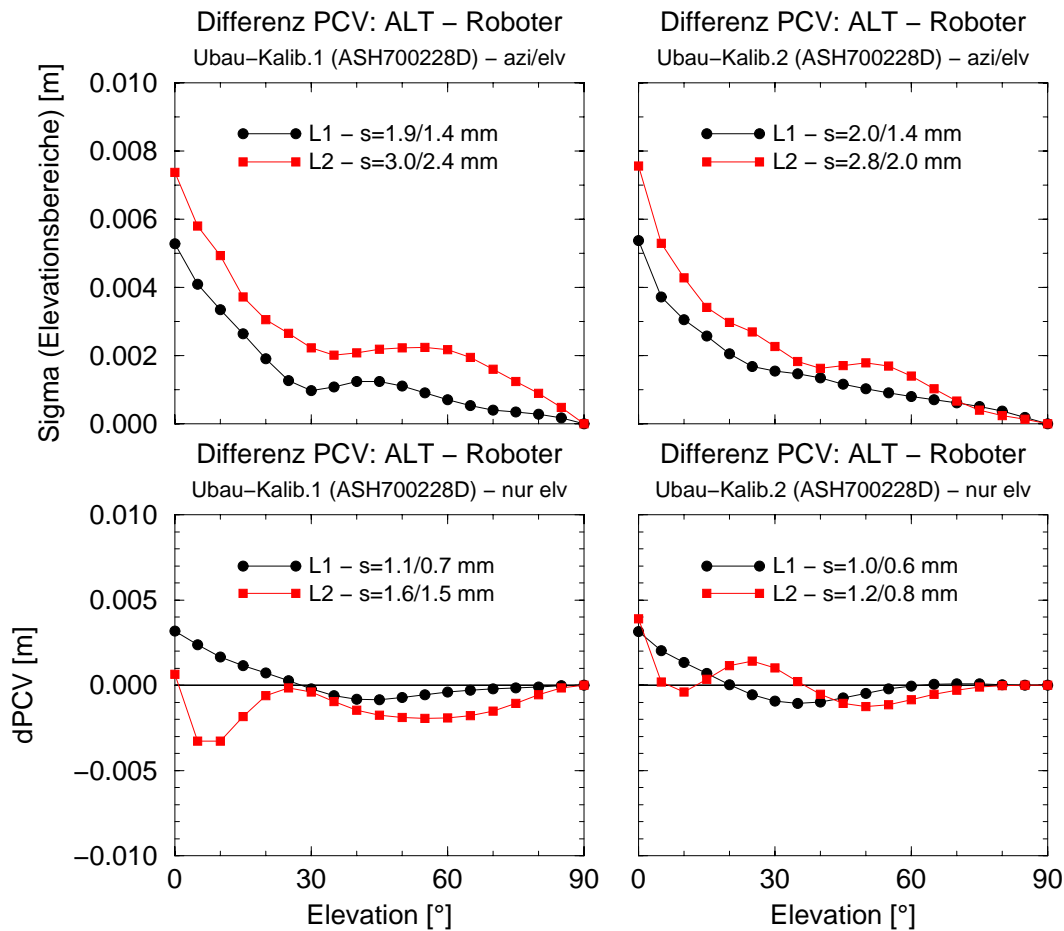


Abbildung 6.1: Vergleich der PCV aus alter Kalibrierung (Unterbau, Tagesdifferenz, manuelle Bedienung) bezüglich Echtzeitergebnissen mit Roboter. Vergleich azimuthal- und elevationsabhängiger PCV (oben) und rein elevationsabhängiger PCV (unten). Gesamtstandardabweichung bis Elevation  $0^\circ/10^\circ$ .

Abbildung 6.1 zeigt, dass diese ersten manuellen Messungen mit Unterbau noch einige Defizite aufwiesen. Dazu gehören die Art und Präzision der Montierung und der enorme Aufwand durch die Einstellungen per Hand. Dadurch können nur eine eingeschränkte Anzahl von Positionen eingestellt werden. Zudem ist die maximale Kippung mit  $\pm 22.5^\circ$  wesentlich begrenzt. Eine Optimierung der Abdeckung, auch von der aktuellen Satellitenkonstellation, kann bei manuellen Bewegungen kaum durchgeführt werden. Durch die generelle  $0^\circ$ -Elevationsmaske und die Kippungen sind differentielle Mehrwegeeffekte teilweise möglich. Werden aus den Differenzen der azimuth- und elevationsabhängigen PCV bis  $0^\circ$ -Elevationsmaske Gesamtstandardabweichungen gebildet, ergeben sich Genauigkeiten von ca. 2 mm für  $L_1$  und 3 mm für  $L_2$  (Abbildung 6.1 oben). Deutlich abfallende Standardabweichungen sind für die Elevationsbereiche am Horizont zu erkennen. Dies bestätigt sich durch die Verbesserungen der Gesamtgenauigkeit, wenn die Standardabweichungen nur aus Differenzen bis hinunter zu  $10^\circ$  Elevation gebildet werden. Eine direkte Zuordnung der Fehler (Montierung, Multipath, Beobachtungsanzahl und Überdeckung) ist kaum möglich. Die Ergebnisse der Vergleiche rein elevationsabhängiger PCV für die gleichen Kalibrierungen (Abbildung 6.1 unten) weisen jedoch nach, dass vor allem die Überdeckung der

Antennenhemisphäre mit Beobachtungen verbessert werden muss. Die Differenzen dieser rein elevationsabhängigen Ergebnisse sind deutlich geringer, was die noch unzureichende Auflösung azimuthaler PCV bestätigt.

Diese Interpretation wiederum lässt sich über einen weiteren Versuch verifizieren. Dabei wird eine Kalibrierung mit Bildung der Tagesdifferenzen mit dem Echtzeitergebnis für eine Trimble Compact ohne Grundplatte (TRM22020.00-GP) verglichen. Für diesen Test wurden die Beobachtungsdaten der Echtzeitkalibrierung mit Roboter gespeichert und zusammen mit den Daten (statisch) des nächsten Tages im Post-Processing ausgewertet. Somit wird ein identisches Messprogramm mit optimierter Überdeckung und eine identische Montierung (Roboter) genutzt. Die Auswertung im Post-Processing kann auf Grund der hohen Anzahl an Beobachtungen mit einer festen Elevationsmaske von  $18^\circ$  durchgeführt werden. Die Ergebnisse des Vergleichs der azimuth- und elevationsabhängigen PCV (Abbildung 6.2) zeigen bereits ein Genauigkeitsniveau, welches nahe an Vergleichen zwischen Echtzeitergebnissen liegt.

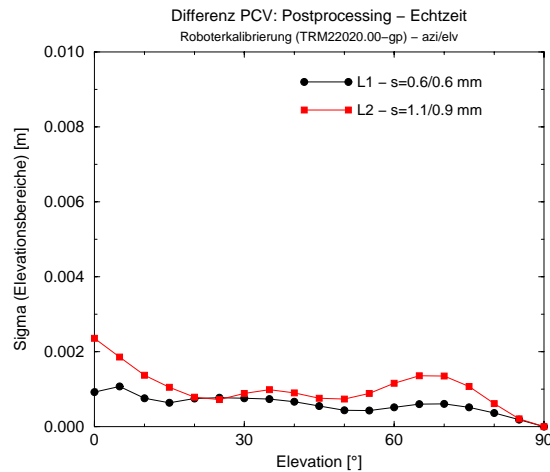


Abbildung 6.2: Vergleich der PCV-Ergebnisse aus Post-Processing und Echtzeitkalibrierung (identische Beobachtungsdaten, Roboter). Gesamtstandardabweichung bis Elevation  $0^\circ/10^\circ$ .

Es wird deutlich, dass vor allem eine optimale Abdeckung mit Beobachtungen für eine hohe Auflösung der PCV von entscheidender Bedeutung ist. Andere verbleibende Restfehler erfahren dadurch zusätzlich einen Mittelungseffekt. Resteffekte in der Tagesdifferenz-Kalibrierung (mit Roboter) sind vor allem

- das nicht vollständige Roboterkorrekturmodell,
- die feste Elevationsmaske,
- die nicht vorhandene negative Elevationsmaske und
- evt. differentielle Mehrwegefehler zwischen den beiden Tagen.

Es zeigt sich, dass die ersten Entwicklungen der Absoluten Feldkalibrierung und das Modell der Nutzung von Tagesdifferenzen funktionell korrekt sind und bereits gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Durch die Neuentwicklungen, vor allem die Automatisierung, entstand ein operationelles Verfahren, welches eine größtmögliche Unabhängigkeit von äußeren Einflussfaktoren aufweist. Dieses wird anhand mehrerer Versuche nachgewiesen.

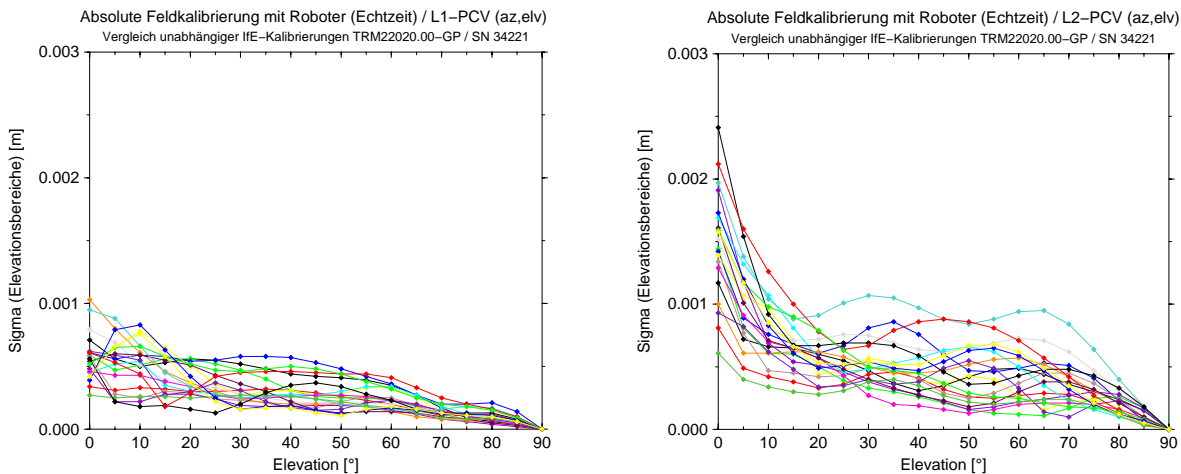


Abbildung 6.3: Wiederholbarkeit ( $L_1$ ,  $L_2$ ) verschiedener Kalibrierungen einer individuellen Antenne (TRM22020.00-GP) über fast zwei Jahre.

Die Unabhängigkeit der Ergebnisse der Absoluten Feldkalibrierung von äußeren Einflüssen und somit die Trennung der PCV von Stationseffekten kann über Vergleiche verschiedener Kalibrierungen nachgewiesen werden. Dabei wurden die sehr guten Wiederholungsgenauigkeiten trotz Unterschieden wie

- Kalibrierungsort,
- Kalibrierungszeit (Tages-, Jahreszeit etc.),
- Wetter (trocken, Regen, Schnee, Wind etc.),
- Roboter (zwei Roboter mit unterschiedlichen Kalibrierungsparametern und Performance),
- Referenzantenne (Wahl verschiedener Typen),
- Hardware (Wahl verschiedener Empfänger),
- Einspannung (Drehung, Höhenversatz etc.),
- ...

erzielt. Als ein Beispiel werden Kalibrierungsergebnisse einer individuellen Trimble Compact Antenne ohne Grundplatte (TRM22020.00-GP) verteilt über fast zwei Jahre gezeigt. Diese Rover-Antenne - ohne Grundplatte zudem empfindlicher für Mehrwegeeffekte - weist starke azimutale Variationen auf (Kapitel 7), die in der Kalibrierung aufgelöst und von Stationseffekten getrennt werden müssen. Somit ist sie gut für Vergleiche verschiedener Kalibrierungen geeignet, um die Wiederholungsgenauigkeiten bei verschiedenen Messprogrammen und äußeren Einflüssen zu bestätigen. Die Messungen wurden am gleichen Ort (Messdach IfE) und mit dem gleichen Roboter durchgeführt. Die Unterschiede ergeben sich durch die verschiedenen Zeiten der Kalibrierungen und dadurch verschiedenen Wetterverhältnissen, Messprogrammen des Roboters und Multipath-Verhältnissen. Aus den Differenzen zwischen den azimut- und elevationsabhängigen PCV-Ergebnissen wurden pro  $5^\circ$  Elevationsbereich Standardabweichungen aus allen Werten ( $5^\circ$  Azimutsschritte) berechnet (Abbildungen 6.3 und 6.4).



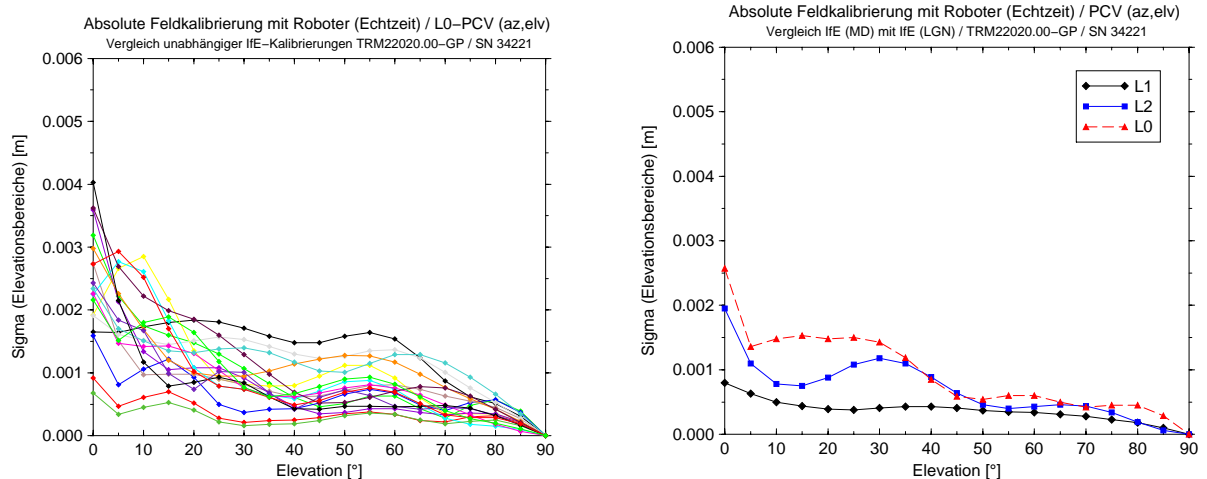


Abbildung 6.4: Wiederholbarkeit ( $L_0$ ) verschiedener Kalibrierungen einer individuellen Antenne (TRM22020.00-GP) über fast zwei Jahre und Vergleich derselben Antenne für weiteren Kalibrierungsort ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_0$ ).

Die erreichten Gesamtstandardabweichungen bis hinunter zum Antennenhorizont liegen für  $L_1$  im Bereich von meistens 0.3 mm bis zu teilweise auch 0.8 mm. Werden die Standardabweichungen nur bis zu einer Elevationsgrenze von  $10^\circ$  gebildet, so liegen die Ergebnisse leicht verbessert in einem engeren Bereich zwischen 0.2 und 0.6 mm. Aber selbst für den Antennenhorizont (Elevationsbereich  $0^\circ$ ) liegen alle Standardabweichungen unter 1 mm. Für  $L_2$  ergeben sich auf Grund der etwas schlechteren Empfangsqualität abfallende Gesamtgenauigkeiten im Bereich von 0.4 bis teilweise um die 1 mm. Es ergibt sich ein deutlicher Unterschied, wenn Differenzen nur bis  $10^\circ$  Elevation gebildet werden. Der Horizont für  $L_2$  weist deutlich größere Differenzen zwischen verschiedenen Kalibrierungen im Vergleich zu höheren Elevationen auf. Es treten Einzelstandardabweichungen nur für diesen Elevationsbereich von bis zu 2 mm auf. Oberhalb  $10^\circ$  liegt man hingegen fast auf dem Niveau für das  $L_1$ -Signal.

Die abgeleiteten  $L_0$ -Werte ergeben die erwarteten verschlechterten Ergebnisse. Ein Mittel aus allen Gesamtstandardabweichungen bis  $0^\circ$  Elevation aus allen Vergleichen ergibt aber immer noch einen sehr guten Wert von 1.2 mm. Die rechte Grafik in Abbildung 6.4 bestätigt das Genauigkeitsniveau ( $s_{L_1/L_2/L_0(0^\circ)} = 0.4/0.8/1.1$  mm) für dieselbe individuelle Antenne, in diesem Fall abgeleitet aus zwei Kalibrierungen mit dem IfE-Roboter an verschiedenen Orten (Messdach IfE und Messdach LGN). Eine weitere Bestätigung der Unabhängigkeit der Absoluten Feldkalibrierung von verschiedenen äußeren Einflussfaktoren ergibt sich aus den Ergebnissen eines Vergleichstests, an dem individuelle Antennen mit unterschiedlichen Messverfahren kalibriert wurden (Feldmann-Westendorff und Sorge 2002). Dabei wurden die Ergebnisse für drei geodätische (G1, G2, G3) und zwei Rover-Antennen (R1, R2) untersucht, die anonymisiert ausgewertet wurden.

Die Wiederholungsgenauigkeit aus dem Vergleich der beiden unabhängigen Ergebnisse der Absoluten Feldkalibrierung (IfE und Geo++<sup>®</sup>) geben ein identisches Bild (Abbildung 6.5) wie in den vorherigen Tests. Die beiden beteiligten Rover-Antennen weisen dabei eine etwas geringere Stabilität in ihren PCV auf. Der Maßstab der Hochachse (Standardabweichungen) wurde hier bewusst bis 2 cm gewählt, um eine einheitliche Darstellung der Vergleiche mit Ergebnissen anderer Kalibrierungsverfahren in diesem Test zu gewährleisten (vgl. Abschnitt 6.3). Die Ergebnisse bestätigen die Unabhängigkeit der PCV von weiteren äußeren Einflüssen. Neben verschiedenen

Messzeiten und somit -programmen und Kalibrierungsorten wurden zwei unterschiedliche Roboter mit voneinander abweichenden Kalibrierungsparametern eingesetzt.

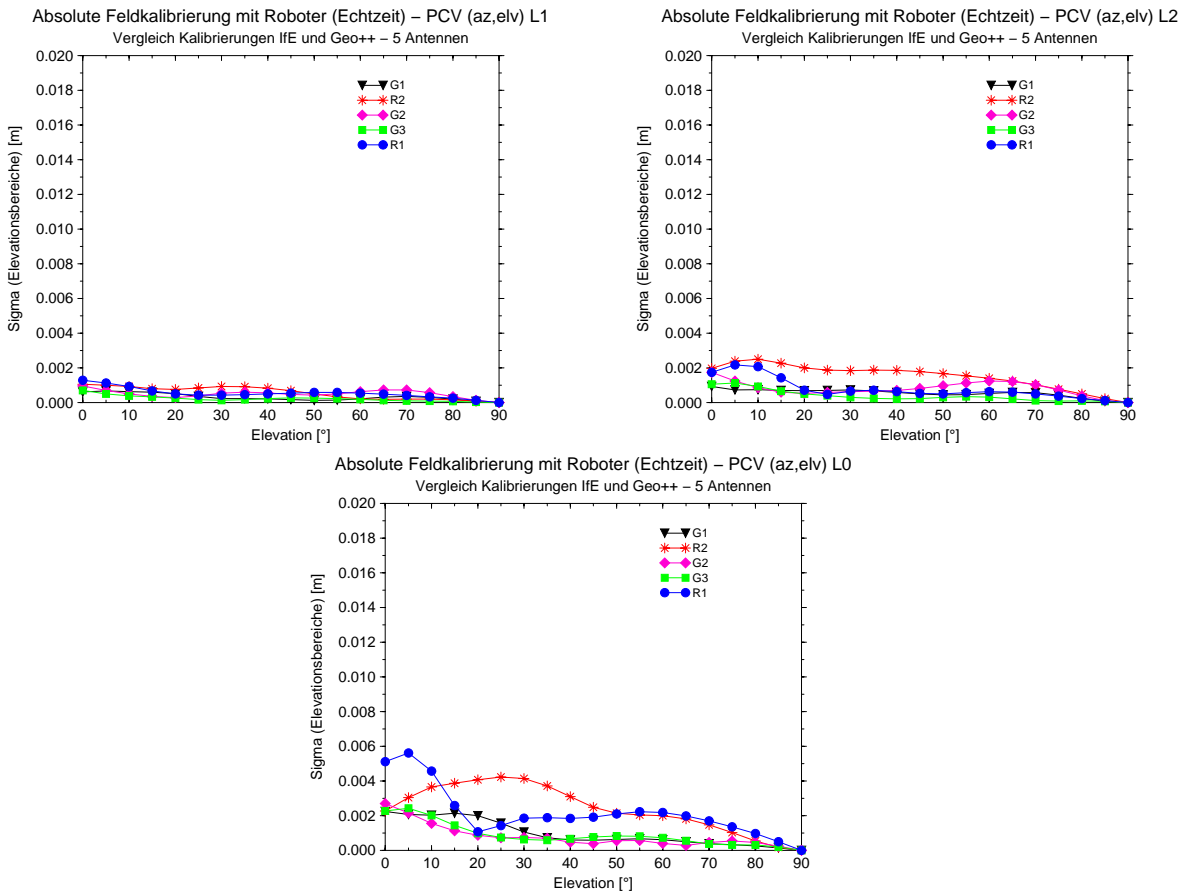


Abbildung 6.5: Wiederholbarkeit der absoluten Feldkalibrierung unterschiedlicher Antennen mit verschiedenen Robotern und an verschiedenen Orten. Vergleich individueller Antennen (kein Typvergleich).

Zwei abschließende Untersuchungen für diesen Bereich weisen die weitgehende Unabhängigkeit von verbleibenden möglichen Einflussparametern nach. In der theoretischen Aufarbeitung und Parametrisierung des Modells für die Absolute Feldkalibrierung wurde bereits gezeigt, dass die PCV-Ergebnisse nicht durch die Wahl der Referenzantenne und der Hardware beeinflusst werden. Mit einer Kalibrierung, bei der gleichzeitig verschiedene Referenzstationen und -antennen und Empfänger eingesetzt werden (Abbildung 6.6), kann der empirische Nachweis für die getroffene Aussage geführt werden. Die zu kalibrierende Antenne (TRM22020.00-GP) auf dem Roboter war dabei mit zwei Empfängertypen verbunden (Ashtech Z-12 und Sensor). Gleichzeitig wurde auf zwei benachbarten Pfeilern eine Rover-Antenne Ashtech Marine (ASH700700.B) und eine geodätische Antenne Ashtech Geodetic II (ASH700228.A) betrieben. Softwareseitig wurden die Datenströme in Echtzeit parallel in den vier möglichen Kombinationen ausgewertet. Durch den identischen Roboter, das identische Messprogramm, die identische Konstellation etc. werden mögliche Resteffekte auf den Einfluss von Referenzstation bzw. -antenne und Hardware reduziert. Wie schon der gewählte Maßstab in Abbildung 6.7 zeigt, sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den erhaltenen PCV-Sätzen zu erkennen.

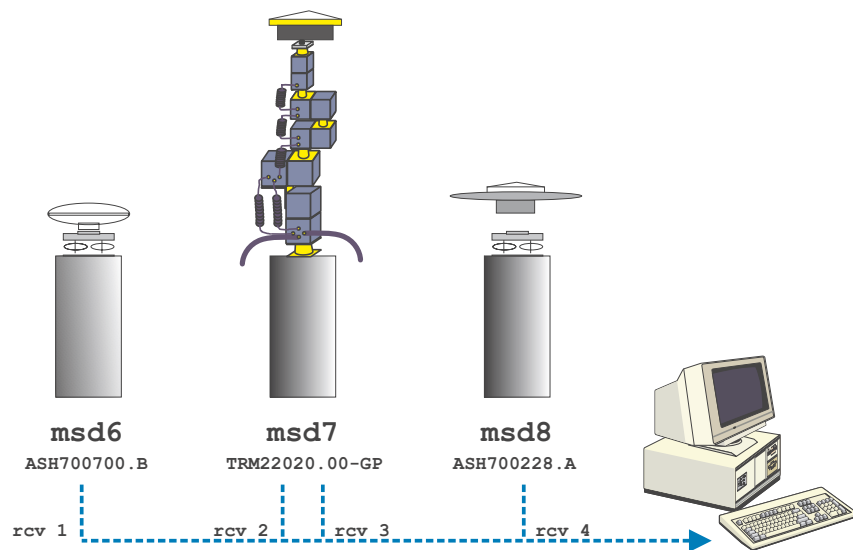


Abbildung 6.6: Test zum Nachweis der Unabhängigkeit der PCV aus Absoluter Feldkalibrierung (Versuchsaufbau). Parallele Kalibrierung mit unterschiedlichen Referenzstationen, -antennen und eingesetzten Empfängern.

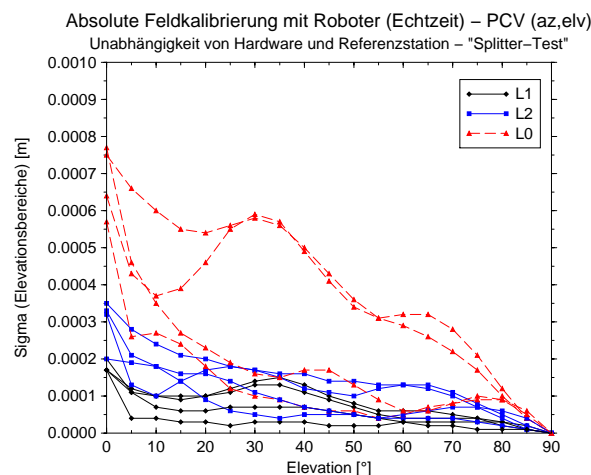


Abbildung 6.7: Ergebnisse des Tests zum Nachweis der Unabhängigkeit der PCV aus Absoluter Feldkalibrierung. Standardabweichungen aus PCV-Differenzen der parallelen Kalibrierungen mit unterschiedlichen Referenzstationen, -antennen und eingesetzten Empfängern.

Vervollständig wird die Untersuchung durch die Kalibrierung einer individuellen Antenne mit vier verschiedenen Empfängern (Ashtech Z-12, Javad Legacy, Leica 500 und Trimble 4700). Sofern unmanipulierte Phasendaten verarbeitet werden, müssen alle Ergebnisse im Rahmen der Realisierungsgenauigkeit (keine Parallelkalibrierung) gleich ausfallen. Die Ergebnisse für die Originalsignale sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Die aus den Differenzen abgeleiteten Genauigkeiten liegen auf dem bereits beschriebenen Niveau, für  $L_1$  mit durchschnittlich 0.3 mm sogar besser. Für  $L_2$  ist die Situation geringfügig anders. Dieses fällt allerdings hier nur auf, weil das Verfahren im Gegensatz zu anderen Feldverfahren überhaupt eine so hohe Genauigkeit der PCV bis zum Antennenhorizont aufweist.

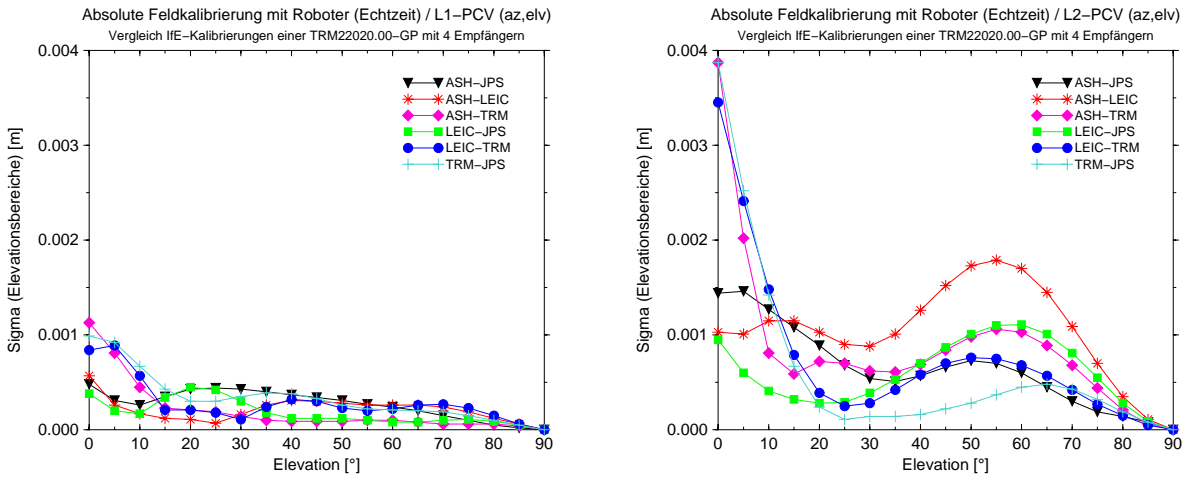


Abbildung 6.8: Differenzen der Kalibrierungen ( $L_1, L_2$ ) einer TRM33429.20+GP mit vier verschiedenen Empfängern.

Für Differenzen zwischen verschiedenen Kalibrierungsergebnissen mit Beteiligung des Trimble 4700 ergeben sich speziell bei Elevationen unter  $10^\circ$  größere Abweichungen. Die Ergebnisse verbessern sich erheblich, wenn diese niedrigen Elevationsbereiche nicht in die Vergleiche einbezogen werden (Tabelle 6.1). Mögliche Ursache für dieses Verhalten ist die Signalrekonstruktion von  $L_2$  unter AS. Speziell dieser Empfänger arbeitet noch mit der Kreuzkorrelationstechnik. Es zeigt sich hier eine schlechtere Messperformance für diese hochdynamische GPS-Anwendung mit schnellen Antennenbewegungen. Durch die Technik selbst entsteht bereits ein höheres Rauschniveau (Breuer u. a. 1993). Dies scheint den Empfang von  $L_2$  im Bereich des Antennenhorizonts, wo auf Grund der Antennenkonstruktion ebenso ein schwächerer Empfang gegeben ist, speziell in dieser schnell bewegten Anwendung negativ zu beeinflussen.

Tabelle 6.1: Vergleich von Kalibrierungen einer TRM22020.00-GP mit unterschiedlichen Empfängertypen.

Standardabweichung [mm]			aus PCV bis $0^\circ$ Elevation			aus PCV bis $10^\circ$ Elevation		
genutzte Empfänger			$L_1$	$L_2$	$L_0$	$L_1$	$L_2$	$L_0$
TRM	-	ASH	0.3	<b>1.2</b>	1.4	0.2	<b>0.7</b>	1.0
TRM	-	LEI	0.4	<b>1.1</b>	1.3	0.2	<b>0.6</b>	0.6
TRM	-	JPS	0.4	<b>1.1</b>	1.5	0.3	<b>0.5</b>	0.9

Obige Versuche wurden durchgeführt, nachdem für einen speziellen Empfänger - nur im Zusammenhang mit einem bestimmten Antennentyp - nach einem Update der Firmware eine Veränderung der  $L_2$ -PCV im Bereich mehrerer Millimeter auftrat. Umfangreiche Untersuchungen zeigten, dass Veränderungen von Empfänger-Optionen betreffend der Rekonstruktion des  $L_2$ -Phasensignals die Ursache waren. Die Veränderung der Bandbreiten für die Kopplung von  $L_1$  und  $L_2$  können in einer hochdynamischen Anwendung speziell im Zusammenhang mit einer Antenne mit stark unterschiedlichen PCV beider Frequenzen Auswirkungen im Ergebnis zeigen. Werden moderne Empfänger für die Kalibrierung genutzt, treten keine Probleme auf. Die Funktionalität und Unabhängigkeit von äußeren Faktoren konnte mit oben beschriebenen Tests nachgewiesen werden.

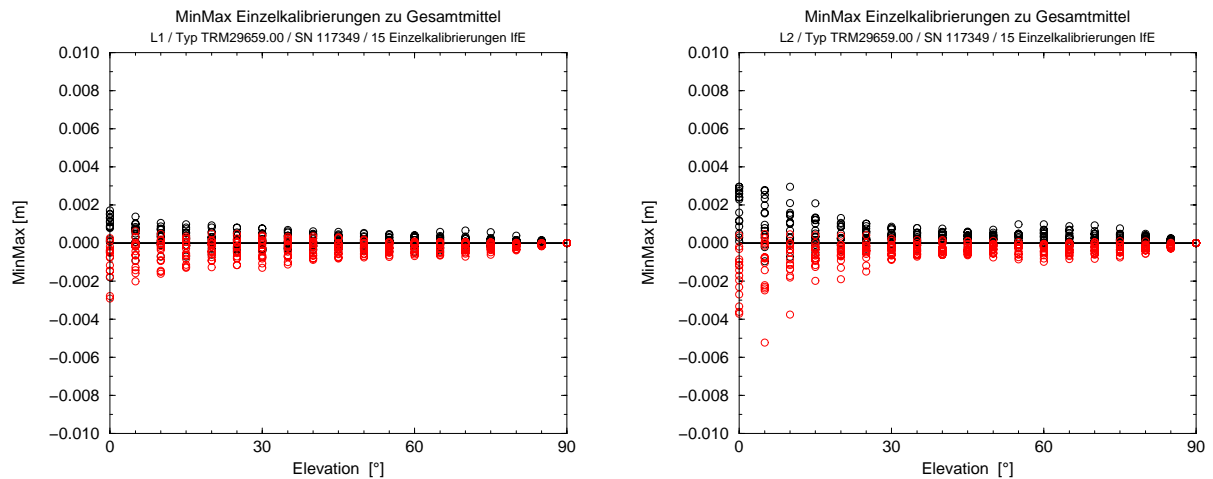


Abbildung 6.9: Minimale und maximale Abweichungen einzelner PCV-Werte aus Einzelkalibrierungen bezüglich des Gesamtmittels (TRM29659.00). Trimble CR mit Dorne Margolin Kreuzdipol-Empfangelement als Beispiel für sehr gute Wiederholbarkeit.

Zum Abschluss der Genauigkeitsbetrachtungen zur Absoluten Feldkalibrierung werden maximale einzelne Abweichungen der PCV einzelner Kalibrierungen betrachtet. Beispielhaft für die Wiederholbarkeit werden in Abbildung 6.9 die Streuungen von 15 Einzelkalibrierungen einer Trimble Choke Ring (TRM29659.00) gegenüber dem Gesamtmittel dargestellt. Am Horizont treten vereinzelt Abweichungen von bis zu 2 mm bei den Ergebnissen für die  $L_1$ -PCV auf. Die Abweichungen bei den  $L_2$ -PCV in den horizontnahen Elevationsbereichen bestätigen ihre etwas höhere Streuung.

Die eingehende Darstellung der inneren und der Wiederholungsgenauigkeit dieses Kalibrierungsverfahrens und seine Unabhängigkeit von äußeren Einflüssen ist von großer Bedeutung, da seine Ergebnisse höchster Genauigkeit als Referenz für Vergleiche anderer Verfahren genutzt werden. Zudem wird das hohe Auflösungsvermögen nachgewiesen, welches erst eine Kalibrierung von azimutalen PCV ermöglicht.

## 6.2 Umrechnung Relativ- und Absolutniveau - Diskussion Nullantenne

Die Ergebnisse aus relativen und absoluten Kalibrierungen sind über die Referenzantenne des Relativverfahrens miteinander verbunden. Bei der Verwendung von PCV-Korrekturen in praktischen Messungen muss immer deren Ursprung bekannt sein, um keine Mischungen von verschiedenen Modellen einzuführen. Es sind verschiedene Möglichkeiten der Nutzung und der Umrechnung ineinander, zum Beispiel für Vergleichszwecke oder gleichzeitigem Einsatz verschiedener Korrekturtafeln, denkbar. Dabei ist ein absolutes Niveau auf Grund der universellen Nutzbarkeit vorzuziehen.

Abbildung 6.10 zeigt die grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten von verschiedenen Kalibrierungsmodellen. Beispielhaft wird an dieser Stelle die Nutzung von PCV-Korrekturen und ihre Überführung in ein anderes Bezugsniveau in einem Referenzstationsnetz diskutiert, da hier verschiedene Anwendungen möglich sind. Es können Daten beliebiger Stationen im Post-Processing ausgewertet werden. Vor allem werden aber die vernetzten Stationen für die Berechnung von Kor-

rekturdaten für Echtzeitanwender (Rover-Stationen) eingesetzt. Auf diese Weise gibt der Netzbetreiber ein Bezugsniveau für die PCV-Modelle vor, welches der Anwender im Feld herstellen muss. Prinzipiell ist die Situation auf jede andere GPS-Anwendung übertragbar. Ein Verzicht auf PCV-Korrekturen sollte in jedem Fall auf der Seite des Netzbetreibers vermieden werden, um systematische Fehler auszuschließen (Kapitel 8). Es verbleiben die Korrekturen von relativen oder absoluten PCV. Eine Korrektur relativer PCV auf Referenzstationsseite bedeutet, dass die PCV der Referenzantenne des Kalibrierungsverfahrens (AOAD/M\_T) noch in den Daten enthalten ist. Bei der Korrektur absoluter PCV werden Antennenfehler im Rahmen der Kalibrierungsgenauigkeit komplett beseitigt. Die Daten beziehen sich auf einen auf den ARP reduzierten Punktstrahler, der so genannten Nullantenne.

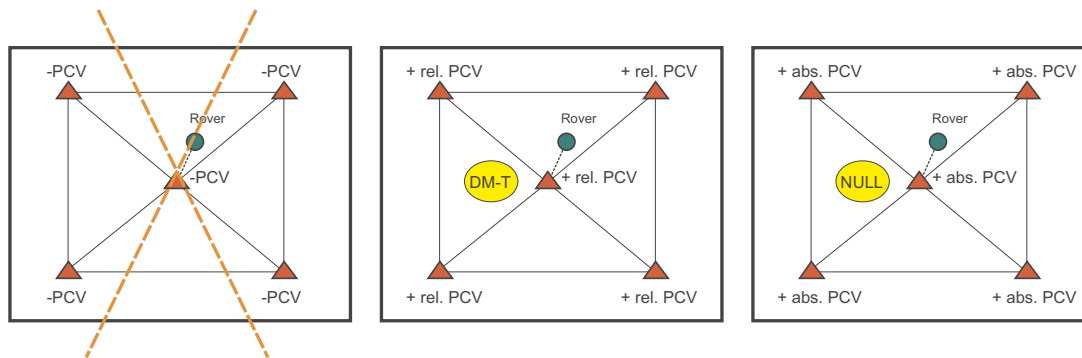


Abbildung 6.10: Möglichkeiten der PCV-Korrektur im Referenznetz.

Für eine Umrechnung der verschiedenen Bezugsniveaus ist die AOAD/M\_T als Quasi-Standard für die Referenzantenne in Relativverfahren von entscheidender Bedeutung. Durch die internationale Verbreitung und Nutzung entsprechender PCV-Korrekturen im IGS-Netz wird dieses Relativniveau auch IGS-Niveau genannt. Wie bereits in Abschnitt 5.2 beschrieben, beziehen sich für diesen Fall relative PCV auf die AOAD/M\_T mit Bezug auf die festgelegten Offsets und die zu Null definierten PCV. Die durch die Offsets beschriebenen PCV werden somit berücksichtigt. Aber die tatsächlichen absoluten PCV der AOAD/M\_T bezüglich dieser festgelegten Offsets (Abbildung 6.11) verbleiben in allen relativen PCV-Ergebnissen und müssen bei der Überführung auf ein Absolutniveau berücksichtigt werden.

Die Umrechnung zwischen einer relativen und einer absoluten PCV-Korrekturabelle (Tabelle 6.2) wird auf diese Weise über den Antennentyp AOAD/M\_T durchgeführt. Dazu wird die Nullantenne in beiden Tabellen eingeführt. Sie wird definiert als Antenne, deren sphärische Wellenfronten im Zentrum des ARP liegen. Tatsächlich ist eine derartige ideale Antenne (isotroper Kugelstrahler, vgl. Kapitel 4) nicht realisierbar. Durch die Korrektur von Beobachtungsdaten mit den kalibrierten PCV der realen Antenne beziehen sich die korrigierten Messdaten aber nominell auf die Nullantenne. In der absoluten Liste besitzt die *Nullantenne\_absolut* somit keine PCV. In der relativen Liste hingegen, in welcher die PCV der AOAD/M\_T Null sind, werden die PCV der *Nullantenne\_relativ* durch die verbleibenden absoluten PCV der AOAD/M\_T bezüglich ihres Referenz-Offsets (IGS-Niveau) repräsentiert. Um die definierte Nullantenne auf relativem Niveau zu korrigieren und mit anderen relativ korrigierten Antennen gemeinsam einzusetzen, muss ein negatives Vorzeichen eingeführt werden. Dies entspricht einer Restitution der PCV.

Anhand der in Abbildung 6.10 (rechts) dargestellten Korrektur von absoluten PCV auf der Seite des Referenznetzes werden die Möglichkeiten für eine Rover-Station beschrieben. Die hohe Genauigkeit und Auflösung der PCV aus der Absoluten Feldkalibrierung mit Roboter (vgl.

Tabelle 6.2: Relative und absolute PCV-Korrekturtabelle und Nullantenne.

relative PCV-Tabelle (IGS-Niveau)	absolute PCV-Tabelle
$AOAD/M\_T = \text{NULL PCV}$ $Off_{L_1/L_2} = 0.110/0.128 \text{ [m]}$	$AOAD/M\_T = \text{abs. PCV}$
$Nullantenne_{relativ} = -(AOAD/M\_T \text{ abs. PCV})$ $Off_{L_1/L_2} = 0.000/0.000 \text{ [m]}$	$Nullantenne_{absolut} = \text{NULL PCV}$

Vorabschnitt) und deren universelle Nutzbarkeit stellt die bestmögliche Lösung für einen Netzbetreiber dar. Die Aussendung von Korrekturdaten mit Bezug auf die Nullantenne ist beispielsweise bereits für das SAPOS<sup>®</sup>-Referenznetz beschlossen worden (*AdV 2002*). Je nach Verfügbarkeit verschiedener Kalibrierungsergebnisse auf der Rover-Station sind verschiedene Szenarien für die PCV-Korrektur bzw. Herstellung des absoluten Niveaus denkbar.

1. keine PCV-Korrektur (Rover)
2. Nutzung relativer PCV (Rover) und  $Nullantenne_{relativ}$  (Referenzstation)
3. Nutzung absoluter PCV (Rover)
  - Absolutniveau direkt aus Kalibrierung
    - Einführung absoluter PCV für Referenzantenne in Relativkalibrierung
    - Absolute Feldkalibrierung mit Roboter
    - (Kammerkalibrierung)
  - Absolutniveau indirekt aus Überführung relativer PCV
    - Nutzung absoluter Offsets und PCV der  $AOAD/M\_T$
    - Einsatz der Nullantenne

Auftretende Probleme, zum Beispiel Genauigkeitsverluste, durch Formate und gewählter Umrechnungsmethode werden abschließend diskutiert. Eine einfache Lösung für den Rover ist ein Verzicht auf jegliche PCV-Korrektur. Je nach Größe der Phasenzentrumsvariationen der eingesetzten Antenne tritt dabei ein Qualitätsverlust der Lösung auf. Als ein Vorteil der Korrektur absoluter PCV auf Seiten der Referenzstation - im Gegensatz zum Einsatz relativer PCV - ergibt sich dabei, dass viele Rover-Antennen (Abschnitt 7.1) relativ kleine Variationen im Empfangsverhalten zeigen und somit der Nullantenne nicht unähnlich sind. Prinzipiell sollte für hochpräzise Anwendungen diese Möglichkeit nicht genutzt werden.

Für den Fall, dass dem Nutzer auf Rover-Seite nur relative PCV zur Verfügung stehen, besteht grundsätzlich die Möglichkeit zu ihrem Einsatz bei gleichzeitiger Korrektur der Referenzstationsdaten mit der  $Nullantenne_{relativ}$ . Da die Daten der Referenzstation auf Grund der Berücksichtigung absoluter PCV frei von Antennenfehlern sind, sich die relativen PCV für den Rover aber auf die  $AOAD/M\_T$  (IGS-Niveau) beziehen, müssen deren PCV durch die Einführung der  $Nullantenne_{relativ}$  für die Referenzstation restituiert werden.

Fehlertheoretisch am günstigsten, da keine Umrechnung verschiedener Modelle durchgeführt werden muss, ist der Einsatz direkt erzeugter absoluter PCV. Die Nutzung von PCV aus identischer Quelle wie auf Seiten der Referenzstation, zum Beispiel aus der Absoluten Feldkalibrierung, ist

ebenso von Vorteil. Grundsätzlich möglich ist weiterhin, absolute PCV in der Relativen Feldkalibrierung durch absolute Korrektur der Referenzstation zu erzeugen (Abschnitt 5.2). Individuelle Ergebnisse aus Kammerkalibrierungen werden, v.a. wegen geringer Verfügbarkeit, selten eingesetzt. Stehen direkt keine absoluten PCV zur Verfügung, kann ein Übergang vom Relativeniveau hergestellt werden. Diese Art der indirekten Herstellung eines absoluten PCV-Niveaus muss auch für Vergleiche von Kalibrierungsergebnissen unterschiedlicher Quellen durchgeführt werden. Analog kann eine Umrechnung vom absoluten auf relatives PCV-Niveau berechnet werden.

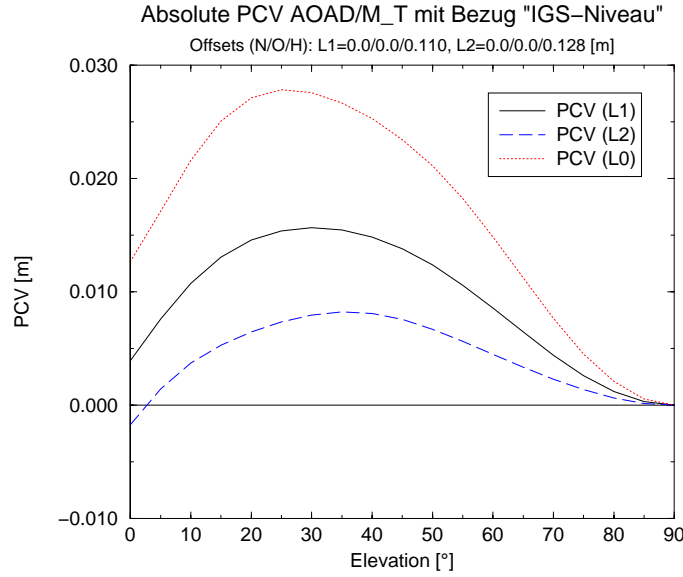


Abbildung 6.11: Absolute PCV der AOAD/M\_T mit Bezug auf IGS-Niveau.

Für den Vergleich bzw. die Umrechnung von absoluten und relativen PCV  $\Delta\varphi_{ANT_f}$  (4.44) gilt allgemein, dass die Differenz der absoluten PCV zweier Antennen A und B mit der Differenz der relativen PCV von A und B identisch ist:

$$\Delta\varphi_{ANT_{abs}}(A) - \Delta\varphi_{ANT_{abs}}(B) = \Delta\varphi_{ANT_{rel}}(A) - \Delta\varphi_{ANT_{rel}}(B) \quad (6.1)$$

Durch Einsetzen der sowohl auf absolutem als auch relativem Niveau bekannten AOAD/M\_T für eine Antenne folgt

$$\Delta\varphi_{ANT_{abs}}(AOA) - \Delta\varphi_{ANT_{abs}}(B) = \Delta\varphi_{ANT_{rel}}(AOA) - \Delta\varphi_{ANT_{rel}}(B). \quad (6.2)$$

Die Auflösung auf die gesuchten absoluten PCV der Antenne B ergibt

$$\Delta\varphi_{ANT_{abs}}(B) = \Delta\varphi_{ANT_{abs}}(AOA) - \Delta\varphi_{ANT_{rel}}(AOA) + \Delta\varphi_{ANT_{rel}}(B). \quad (6.3)$$

Mit den absoluten und relativen PCV der AOAD/M\_T können nun die relativen PCV jeder beliebigen Antenne (B) auf Absolutniveau gebracht werden. Dabei müssen jeweils die Offsets



$$\mathbf{X}_{Off_{abs}}(B) = \mathbf{X}_{Off_{abs}}(AOA) - \mathbf{X}_{Off_{rel}}(AOA) + \mathbf{X}_{Off_{rel}}(B) \quad (6.4)$$

und die auf diese Offsets bezogenen PCV

$$\Delta\varphi_{PCV_{abs}}(B) = \Delta\varphi_{PCV_{abs}}(AOA) - \Delta\varphi_{PCV_{rel}}(AOA) + \Delta\varphi_{PCV_{rel}}(B) \quad (6.5)$$

umgerechnet werden. Dabei sind die relativen PCV der AOAD/M\_T Null. Werden die absoluten PCV der AOAD/M\_T mit (4.48) bzw. (4.49) auf die festgelegten Offsets des IGS-Niveaus umgerechnet, so müssen im Folgenden nur noch die  $\Delta\varphi_{PCV}$  betrachtet werden. Die Offsets nehmen nicht mehr an der Umrechnung teil und es ergibt sich

$$\Delta\varphi_{PCV_{abs}}(B) = \Delta\varphi_{PCV_{abs}}(AOA) + \Delta\varphi_{PCV_{rel}}(B). \quad (6.6)$$

Die Offsets aus den Ergebnissen der Relativkalibrierung verbleiben somit auf ihren vorherigen Werten auch auf Absolut-Niveau. Die Summe aus Offsets und PCV entspricht diesem neuen Niveau. An dieser Stelle kann jetzt die oben beschriebene *Nullantenne<sub>relativ</sub>* eingesetzt werden. Ihr Vorzeichen muss wieder umgekehrt werden, da sie normalerweise zur Restitution der PCV dient. Somit wird u.a. eine sehr einfache Möglichkeit für die schnelle Umrechnung relativer PCV eines Rovers bereitgestellt. Es folgt

$$\Delta\varphi_{PCV_{abs}}(B) = -\Delta\varphi_{PCV_{Nullantenne_{relativ}}} + \Delta\varphi_{PCV_{rel}}(B). \quad (6.7)$$

Die mathematisch strenge Überführung von PCV-Ergebnissen auf Relativ- bzw. Absolut-Niveau durch einfache Addition bzw. Subtraktion und für Vergleichszwecke eine anschließende Umrechnung mit (4.51) auf einen einheitlichen Bezugspunkt (ARP) beinhalten teilweise Genauigkeitsverluste auf Grund von Definitionsproblemen, eingesetzten Formaten und Mischungen von Ergebnissen verschiedener Kalibrierungsmethoden. Dazu gehören:

1. Vernachlässigung azimuthaler PCV
2. Behandlung Lage-Offsets bei Umrechnungen rein elevationsabhängiger PCV
3. Definition und Bestimmung von Offsets
4. Realisierung der AOAD/M\_T
5. Systematiken in Kalibrierungsergebnissen

Die Vernachlässigung azimuthaler PCV kann in Abhängigkeit vom eingesetzten Antennentyp Ungenauigkeiten im Bereich einiger Millimeter bedeuten, für das  $L_0$ -Signal teilweise auch mehr. Selbst für Antennen mit geringen azimuthalen Variationen verbleiben zum Beispiel für  $L_0$  noch Fehler, die nicht zu vernachlässigen sind (Abbildung 6.12). Im Beispiel werden die minimalen und maximalen Abweichungen zwischen Elevations- und Vollmodell pro  $5^\circ$  - Elevationsbereich

für individuelle Kalibrierungsergebnisse zweier Antennen gebildet. Beide Antennen weisen nur sehr geringe azimutale Phasenzentrumsvariationen auf (Kapitel 7). Bei der Trimble Choke Ring (TRM29659.00) mit Dorne-Margolin Antennenelement, vergleichbar mit der  $AOAD/M\_T$ , ergeben sich durch die Vernachlässigung azimutaler PCV Differenzen bis zu  $\pm 0.7$  mm für  $L_1$ ,  $\pm 1.4$  mm für  $L_2$  und  $\pm 3.3$  mm für  $L_0$ . Die Differenzen für die Originalsignale sind relativ gering. Dieser Antennentyp ist hier durch rein elevationsabhängige Korrekturen verhältnismäßig gut repräsentiert. Für das ionosphärisch korrigierte Signal  $L_0$  ist die Differenz beachtenswert, da der Antennentyp besonders auf Referenzstationen eingesetzt wird. Dies gilt u.a. auch für die Trimble Microcentered (TRM33429.20+GP) mit ihren kleinen Lage-Offsets und geringen azimutalen Variationen. Es ergeben sich Differenzen bis zu  $\pm 1.6$  mm für  $L_1$ ,  $\pm 2.6$  mm für  $L_2$  und  $\pm 6.3$  mm für  $L_0$ . Diese Größenordnung ist für hochpräzise Anwendungen nicht mehr tolerierbar (Abschnitt 4.5). Es wird deutlich, dass auch bei Antennentypen mit geringeren azimutalen PCV diese bei ihrer Vernachlässigung einen nicht unwesentlichen Einfluss auf hochgenaue Anwendungen haben können.

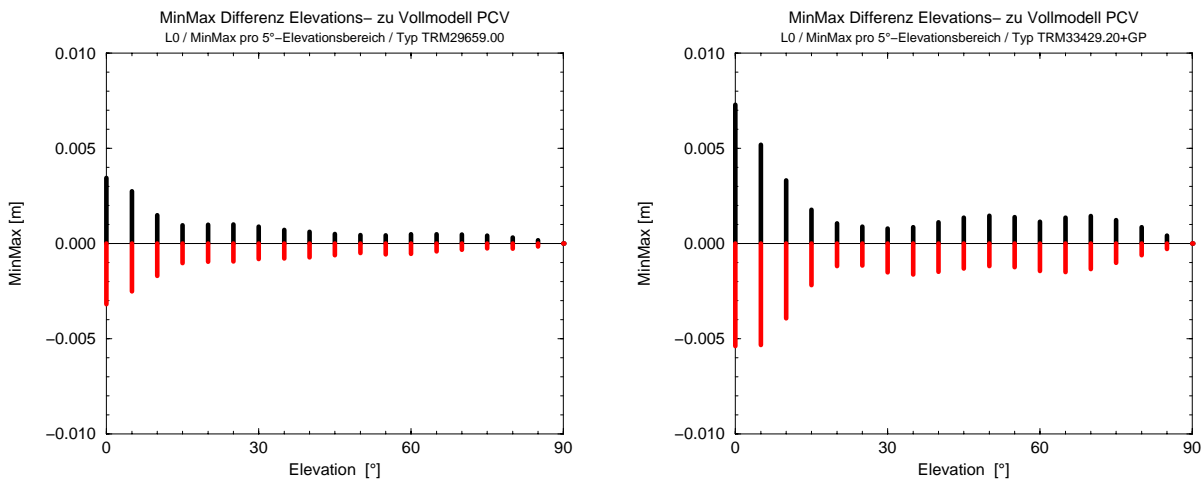


Abbildung 6.12: Minimale und maximale Abweichungen der PCV-Differenz ( $L_0$ ) zwischen Elevations- und Vollmodell am Beispiel von Antennen mit kleinen azimutalen Variationen. Trimble Choke Ring (TRM29659.00) und Trimble Microcentered (TRM33429.20+GP).

Ein weiteres Problem bei Umrechnungen von rein elevationsabhängigen PCV betrifft die Behandlung von Lage-Offsets. Sie repräsentieren azimutale Variationen und können aus diesem Grund nicht genutzt werden (Abschnitt 4.4.2). Es kann nur der Höhenoffset umgerechnet werden. Dies betrifft auch die Nullantenne. Auf Grund einer fehlenden international anerkannten Formatdefinition für azimut- und elevationsabhängige Antennenkorrekturen konnte die *Nullantenne<sub>relativ</sub>* erst im rein elevationsabhängigen IGS-Format zur Verfügung gestellt werden. Das beinhaltet automatisch und rein formatbedingt die Vernachlässigung von bis zu 0.6 mm für die Lage-Offsets der  $AOAD/M\_T$  ( $L_{1\text{Nord/Ost}}[\text{mm}] = 0.60 / -0.46$  und  $L_{2\text{Nord/Ost}}[\text{mm}] = -0.10 / -0.62$ ), die bei der Umrechnung der absoluten PCV auf die festgelegten Offsets des IGS-Niveaus nicht berücksichtigt werden kann (*IfE, Geo++<sup>®</sup> 2000*). Die Größenordnung ist somit wesentlich geringer als die Genauigkeitsverluste bei Nutzung rein elevationsabhängiger Modelle. Mit Beginn des Jahres 2003 sollen im IGS auch absolute PCV eingeführt werden (*Moore und Weber 2002*). Gleichzeitig wird dann auf eine hochauflösende Formatdefinition ANTEX (*Antenna Exchange Format*) umgestellt (*Rothacher und Mader 2002*). Ergebnisse von azimut- und elevationsabhängigen Typmitteln aus der Absoluten Feldkalibrierung mit Roboter werden dann für die im IGS eingesetzten Antennen zur Verfügung gestellt.

Die Offset-Problematik wurde bereits ausführlich in Abschnitt 5.1 behandelt. Es wird deutlich, dass verschiedene Kalibrierungen unterschiedliche Bestimmungen der Offsets beinhalten. Die Kriterien sind zudem nicht immer bekannt. Dies gilt auch für die festgelegten Offsets der AOAD/M\_T auf IGS-Niveau. Bei Umrechnung zwischen verschiedenen PCV-Niveaus werden auf diese Weise immer Mischungen verschiedener Definitionen durchgeführt. Die Offsets selbst haben dann keine eindeutige Definition mehr. Ähnliches gilt für die Realisierung der AOAD/M\_T. Die mit dem Verfahren der Absoluten Feldkalibrierung mit Roboter bestimmten PCV stellen eine konkrete Realisierung dar (*IfE, Geo++<sup>®</sup> 2000*). Eine andere mögliche ist die AOAD/M\_T, die zum Beispiel beim NGS als Referenzantenne für die Relativkalibrierung eingesetzt wird. Das individuelle Empfangsverhalten unterscheidet sich hier natürlich nicht nur von der IGS-Konvention, sondern u.U. auch von anderen Antennen des Typs AOAD/M\_T. Eine weitere Unsicherheit stellen mögliche Systematiken der Kalibrierungen dar. Vor allem die relativen Feldkalibrierungen (vgl. auch nächsten Abschnitt) können durch ihre individuelle Durchführung und Modellierung durch Umgebungs- und Konstellationseffekte beeinflusst sein. In der Summe der einzelnen Unsicherheiten wird ersichtlich, dass bei der Umrechnung zwischen PCV-Niveaus verschiedene genaigkeitsbeeinflussende Effekte vorhanden sind, die beachtet werden müssen. Eine einheitliche Nutzung von absoluten Kalibrierungsergebnissen aus einer identischen Quelle ist vorzuziehen.

Neben der Umrechnung und Verwendung verschiedener PCV-Niveaus und entsprechender Formate für die Korrekturen sind die Behandlung von Antennenkorrekturen in Post-Processing und Echtzeitanwendungen von Bedeutung. Die Behandlung der Antennenkorrekturen im Post-Processing ist über das Datenformat RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) unproblematisch (*Gurtner 2002*). Durch entsprechende Header-Informationen werden dem Nutzer die verwendete Antenne (Nummer, Typ) und Exzentrizitäten (Offset bezüglich ARP) mitgeteilt. Der Anwender kann über die reine Information des Antennentyps, u.U. auch über die individuelle Nummer, selbst über die Nutzung entsprechender Korrekturen entscheiden. Generell wird davon ausgegangen, dass noch keine PCV-Korrekturen an den Daten vorgenommen wurden. Bei Echtzeitdiensten ist die Problematik eine andere. Das Korrekturformat des RTCM, SC104 (*Radio Technical Commission For Maritime Services, Special Committee No. 104*) wird ständig weiterentwickelt, wobei speziell in älteren Versionen einige Unklarheiten bezüglich der verwendeten Antenne und entsprechender Korrekturen vorhanden waren. Dazu gehören ein fehlender Message Typ für das Setup (Antenne? Dome?), keine Information für den Nutzer über die Phasenzentren (Offsets? PCV? Relativ? Absolut? Korrektion?) und eine unklare Behandlung bzw. Definition des Referenzpunktes in Message Typ 22. In der aktuellen RTCM Version 2.3 (*RTCM 2001*) ist jetzt eine klare Behandlung der Antennenproblematik vorgeschrieben. Auf Seiten der Referenzstation und auch beim Rover kann mit der zur Verfügung gestellten Information frei über die Korrektur entschieden werden. Zu den Mitteilungen gehören die Message Typen 23 und 24 mit den entsprechenden Informationen über PCV und ARP. In der Nachfolgeversion 3.0 werden noch Verfeinerungen hinsichtlich der Modellierung wie zum Beispiel zum Einsatz einer Nullantenne vorgenommen (*Euler 2002*).

### 6.3 Relativ- und Absolutkalibrierungen - Unterschiede und Vergleiche

Der geführte Nachweis des hohen Genauigkeitsniveaus der Absoluten Feldkalibrierung und die Darstellung der Umrechnung zwischen verschiedenen Kalibrierungen ermöglichen im Folgenden beispielhaft einen Vergleich zwischen Relativer und Absoluter Feldkalibrierung. Das Relative

Feldverfahren wurde bereits ausführlich beschrieben, sodass die Ursachen von auftretenden Differenzen in den Vergleichen interpretiert werden können. Es werden die gesamten PCV verglichen und keine Vergleiche der Offsets durchgeführt. Dies wurde in Abschnitt 5.1 behandelt. Es werden direkte Vergleiche jeweils zweier PCV-Sätze mit identischem Bezugspunkt und mit der Zenitbedingung  $PCV^z = 0$  angestellt. In einer Ausgleichung mehrerer PCV-Korrekturen (Schmid und Rothacher 2002) kann hingegen ein additiver Wert pro Korrekturmodell geschätzt werden (vgl. auch Abschnitte 4.4.2 und 5.2). Der konstante Wert ist ohne Einfluss in einer GPS-Auswertung, da er im Uhrfehler aufgeht. Es allerdings zu beachten, dass unterschiedliche Verschiebungen der PCV für  $L_1$  und  $L_2$  zu nicht realen Differenzen zwischen den Frequenzen führen, die sich in Uhrfehler bzw. Hardware delays niederschlagen. Für zukünftige hochgenaue Anwendungen ist dies zu beachten (Wübbena und Schmitz 2003). Eine Betrachtung der Verbesserungen im Modell mit Berücksichtigung konstanter Verschiebungsparameter zeigt kleinere Abweichungen als die Betrachtung der direkten Differenzen zweier Kalibrierungen mit einheitlichem Referenzpunkt und identischer Zenitbedingung. Auf diesen Ausgleichungsansatz wird hier bewusst verzichtet. Wie es bereits bei der Ableitung der äußeren Genauigkeit für die Absolute Feldkalibrierung durchgeführt wurde, bietet ein direkter Vergleich Vorteile in der Interpretation und deckt Schwachstellen eines Modelles auf. Durch die real vorhandenen Einflüsse in einigen Kalibrierungsverfahren ergeben sich Differenzen zwischen beiden Vorgehensweisen. In einem direkten Vergleich können auftretende Systematiken auf diese Weise gut interpretiert werden. Die Fehler der betroffenen Bereiche werden nicht über einen konstanten Parameter verschoben.

Die am häufigsten genutzten PCV-Korrekturen sind die frei verfügbaren rein elevationsabhängigen relativen Korrekturen des NGS (Mader 1999). Beispielhaft werden sechs willkürlich ausgesuchte Antennentypen mit den Ergebnissen der Absoluten Feldkalibrierung verglichen. Dazu gehören sowohl Rover- als auch geodätische Antennen, sowie eine Choke Ring Antenne vom Dorne-Margolin Typ (Tabelle 6.3). In den Vergleichen werden die Typergebnisse des NGS individuellen Korrekturen der Absoluten Feldkalibrierung gegenübergestellt. Die Tests werden auf Absolut-Niveau durchgeführt. Dabei werden die absoluten NGS-Tabellen verwendet. Diese wurden vom NGS durch Umrechnung der Relativergebnisse nach (6.4) und (6.5) mit dem absoluten Ergebnis der Roboterkalibrierung für die  $AOAD/M\_T$  (IfE, Geo++<sup>®</sup> 2000) erzeugt. Auf Grund der rein elevationsabhängigen PCV können Lage-Offsets, wie im Vorabschnitt bereits dargelegt, nicht verarbeitet werden. Um Vernachlässigungen von Lage-Offsets bei der Umrechnung auf einen identischen Referenzpunkt zu umgehen, wurden für den Vergleich jeweils die Vollmodelle der Absoluten Feldkalibrierung auf den Offset des NGS umgerechnet. Anschließend wurden die rein elevationsabhängigen PCV durch Mittelung über alle Azimute hergestellt.

Die Differenzen für die sechs ausgewählten Antennen für  $L_1$  und  $L_2$  werden in Abbildung 6.13 dargestellt. Die Standardabweichungen aus den Differenzen (Tabelle 6.3) zeigen, dass die reinen Elevationsmodelle zueinander passen. Je nach Antenne betragen sie ca. 1 mm für  $L_1$  und 1-3 mm für  $L_2$ . Für  $L_0$  ergeben sich 2-5 mm. Eine Ausnahme zeigt die TRM33429.20+GP mit über 1 cm für die  $L_0$ -Standardabweichung. Wie in den Abbildungen zu erkennen, beruht dieses vor allem auf dem Verlauf der  $L_1$ -PCV. Die Differenz zur Absoluten Feldkalibrierung verläuft fast parallel zur Nullachse bei 6 mm. Hier liegt das Problem in den Zenitbeobachtungen bei der NGS-Kalibrierung. Dies ist möglicherweise auf das Nordloch und entsprechend fehlende Beobachtungen zurückzuführen, da beim NGS keine Drehungen durchgeführt werden. Ein Fehler im Zenit wirkt sich durch die Zenitbedingung  $PCV^z = 0$  auf die gesamte PCV-Lagerung aus. Ein konstanter Verschiebungsparameter (s.o.) würde die Größenordnung der Differenzen an dieser Stelle erheblich verkleinern. Dies wird einmal beispielhaft in Tabelle 6.3 durchgeführt.

Die absolute Differenzbildung verdeutlicht die Schwächen des Relativverfahrens. Durch die Ableitung rein elevationsabhängiger PCV und der Mittelung über alle Azimute wird dennoch ein gu-

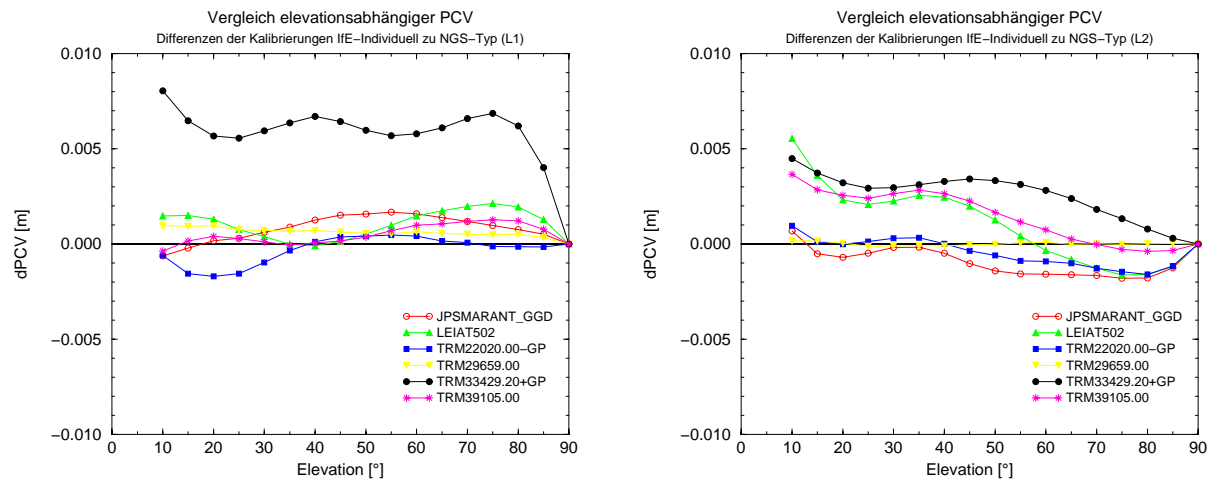


Abbildung 6.13: Rein elevationsabhängige Differenzen zwischen IfE und NGS für verschiedene geodätische und Rover-Antennen ( $L_1$ ,  $L_2$ ).

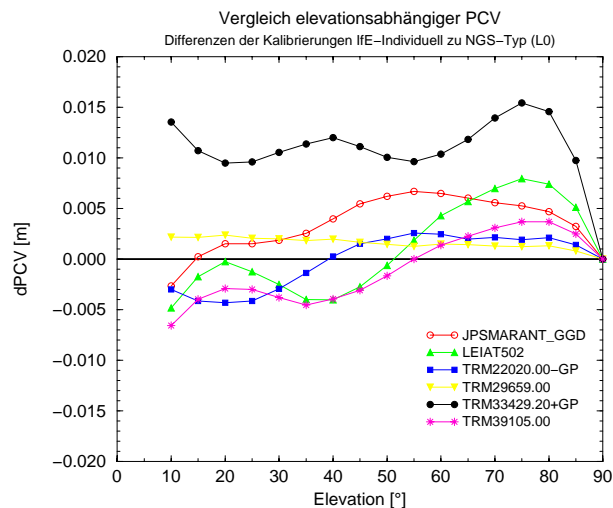


Abbildung 6.14: Rein elevationsabhängige Differenzen zwischen IfE und NGS für verschiedene geodätische und Rover-Antennen ( $L_0$ ).

tes Genauigkeitsniveau erreicht, wenn auch das übergeordnete Ziel von 1 mm nicht durchgehend erreicht wird. Der Verlauf der Differenzen zeigt, dass trotz der azimuthalen Mittelung Stationseffekte wie Multipath vermutlich noch einen Resteinfluss haben, möglicherweise bedingt durch das Kalibrierungsverfahren ohne Drehungen. Dies wird durch die Differenzkurve der Choke Ring Antenne (TRM29659.00) bestätigt, die die beste Übereinstimmung liefert. Die Rover-Antennen hingegen, zum Beispiel die LEIAT502, weisen die größten Variationen auf. Weitere Gründe für Differenzen können das bereits beschriebene Zenitproblem sein, wobei sich Abweichungen in diesem hohen Elevationsbereich in tiefere Bereiche fortpflanzen. Auch die Referenzantenne kann zu den Abweichungen beitragen. Die beim NGS eingesetzte AOAD/M\_T wird sich geringfügig von der in Hannover kalibrierten Antenne unterscheiden. Zudem können sich Stationseffekte auf die Referenzantenne in den Ergebnissen widerspiegeln. Größte Nachteile dieser Relativergebnisse sind die nicht bestimmten PCV unter 10° Elevation und die nicht ableitbaren azimuthalen PCV.

Dadurch ist ein universeller Einsatz nicht gegeben. Für Anwendungen mit Zentimetergenauigkeiten und Rover-Antennen ergibt sich dadurch kein Nachteil. Für höchste Genauigkeiten, speziell in Kurzzeitanwendungen, sollte ein hochauflösendes Antennenmodell vorhanden sein (Kapitel 8). Ähnliche Ergebnisse zeigen unabhängige Untersuchungen anderer Gruppen (*Rothacher 2001*), wobei dort vor allem das Modell der Absoluten Feldkalibrierung mit Roboter geprüft wird.

Tabelle 6.3: Standardabweichungen aus rein elevationsabhängigen Differenzen (bis 10° Elevationsmaske) zwischen IfE und NGS für verschiedene geodätische und Rover-Antennen (Beispiele). Vergleich auf Absolut-Niveau (identischer ARP). Beispielhaft Berücksichtigung mittlerer konstanter Verschiebung der PCV für  $s^*$ .

Antennentyp	Standardabweichung [mm]					
	$s(L_1)$	$s^*(L_1)$	$s(L_2)$	$s^*(L_2)$	$s(L_0)$	$s^*(L_0)$
JPSMARANT_GDD	1.0	0.7	1.2	0.8	4.3	3.0
LEIAT502	1.3	0.7	2.2	2.1	4.3	4.3
TRM22020.00-GP	0.8	0.7	0.8	0.8	2.5	2.6
TRM29659.00	0.7	0.3	0.1	0.1	1.7	0.6
TRM33429.20+GP	6.0	1.6	2.8	1.2	11.3	3.2
TRM39105.00	0.7	0.5	2.0	1.4	3.3	3.3

Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus dem bereits in Abschnitt 6.1 angesprochenen Test zur Kalibrierung individueller Antennen (*Feldmann-Westendorff und Sorge 2002*) mit verschiedenen Verfahren bestätigt die getroffenen Aussagen. Dabei wurden die Ergebnisse von zwei Roboterkalibrierungsstellen (IfE, GEO++<sup>®</sup>), von zwei verschiedenen Kalibrierungsorten (TUD, LGN) eines vier Antennenorientierungen nutzenden Relativverfahrens (*Wanninger 2002*) und einer zwei Antennenorientierungen nutzenden Relativkalibrierung (GIUB) (*Görres 2001*) verglichen. Die obigen Aussagen können teilweise präzisiert werden, da individuelle Antennen kalibriert wurden und somit Unterschiede innerhalb eines Antennenmodells ausgeschlossen werden können. Zudem liegen Vollmodelle der Relativverfahren vor und können bewertet werden. Es werden wie beim vorherigen Beispiel direkte absolute Differenzen bezüglich eines einheitlichen Referenzpunktes (ARP) und identischer Zenitbedingung  $PCV^z = 0$  gebildet. Die Relativverfahren haben das Absolutniveau durch Einführung absoluter PCV des Roboterverfahrens für die jeweilige Referenzantenne hergestellt.

Die Abbildungen 6.15 und 6.16 zeigen vorab die Differenzen von reinen Elevationsmodellen beispielhaft für eine Antenne, die nach Umrechnung der Vollmodelle auf einen einheitlichen Bezugspunkt durch Mittelung über alle Azimute erzeugt wurden. Das Genauigkeitsniveau liegt ähnlich wie in der vorherigen Untersuchung. Die Differenzen verlaufen teilweise nicht parallel zur Nullachse, sondern zeigen systematische Effekte in verschiedenen Elevationsbereichen. Dies weist auf Restfehler, zum Beispiel Multipath, der Relativverfahren hin. Speziell die höheren Abweichungen von Rover-Antennen (vgl. Untersuchungen der Vollmodelle) und systematische Unterschiede zwischen identischen Relativverfahren auf unterschiedlichen Standorten bestätigen dies. Die systematischen Differenzen lassen sich nicht durch einen konstanten Verschiebungsparameter beschreiben.

In den Abbildungen 6.17 und 6.18 werden beispielhaft die Vollmodelle für alle am Test beteiligten (anonymisierten) individuellen Antennen von IfE und LGN verglichen. Dabei wurden für jeden Elevationsbereich aus allen Differenzen über den gesamten Azimutbereich eine Standardabweichung gebildet. Es wird somit auch das azimutale Auflösungsvermögen beurteilt. Der Maßstab der Hochachse der Graphik ist identisch mit Abbildung 6.5, wo die beiden Ergebnisse des Abso-

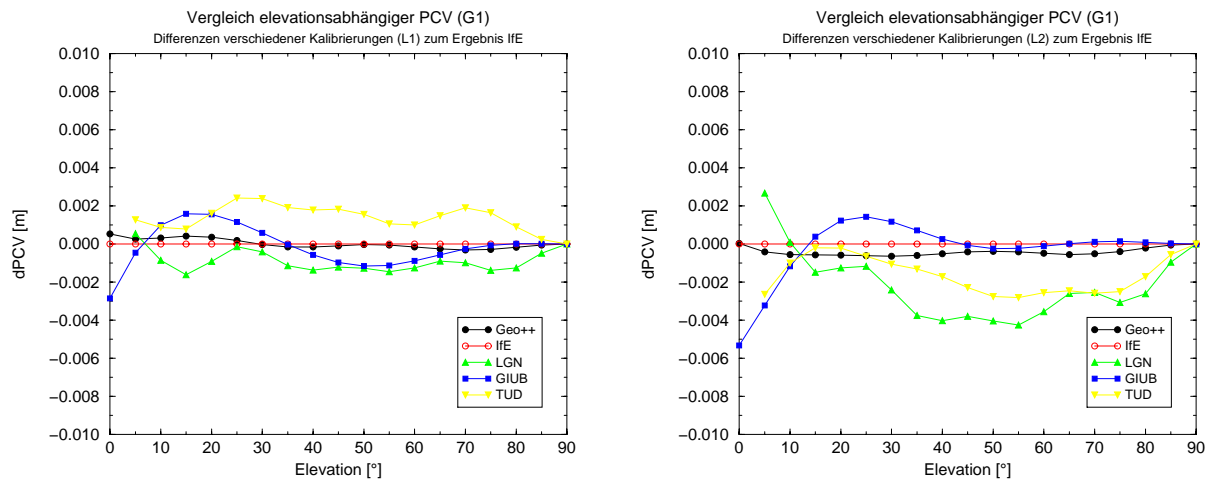


Abbildung 6.15: Rein elevationsabhängige Differenzen verschiedener Feldkalibrierungen für eine individuelle geodätische Antenne ( $L_1$ ,  $L_2$ ).

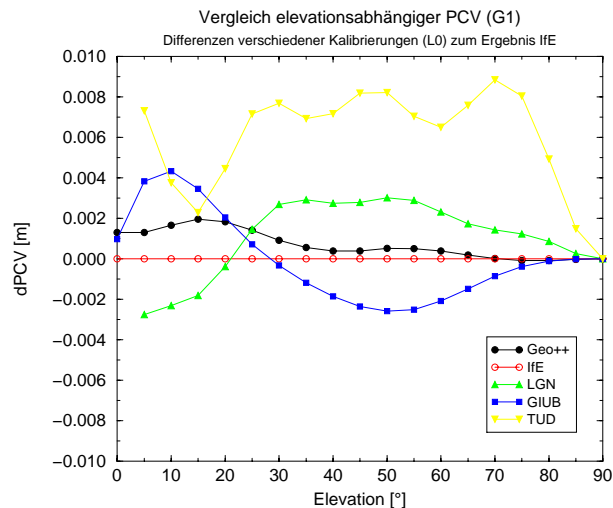


Abbildung 6.16: Rein elevationsabhängige Differenzen verschiedener Feldkalibrierungen für eine individuelle geodätische Antenne ( $L_0$ ).

luten Feldverfahrens aus diesem Test verglichen wurden (IfE, GEO++<sup>®</sup>). Das unterschiedliche Niveau ist bereits qualitativ gut zu erkennen. Zu beachten ist, dass für den Horizont keine signifikanten Ergebnisse aus dem Relativverfahren geliefert wurden. Für einzelne Elevationsbereiche ergeben sich Standardabweichungen von bis zu 4 mm für  $L_1$ , 6 mm für  $L_2$  und maximal 1 cm für  $L_0$ . Vor allem die Ergebnisse des Relativverfahrens der beiden Rover-Antennen weisen stärkere Differenzen zum Roboterverfahren auf als bei den geodätischen Antennen. Dies bestätigt den Einfluss von Stationseffekten. Auch die hier nicht mehr explizit dargestellten Vergleiche zwischen den Relativverfahren selbst (LGN, TUD), die ein ähnliches Niveau aufweisen, zeigen, dass sich verschiedene systematische Effekte auf die PCV-Ergebnisse auswirken.

Tabelle 6.4 zeigt am Beispiel der Antenne G2 die mittleren Standardabweichungen bis 10° Elevationsmaske. Wird ein konstanter Verschiebungsparameter zugelassen, so ergeben sich etwas bessere Werte (*Schmid und Rothacher 2002*). Das Absolute Feldverfahren weist durchschnittlich

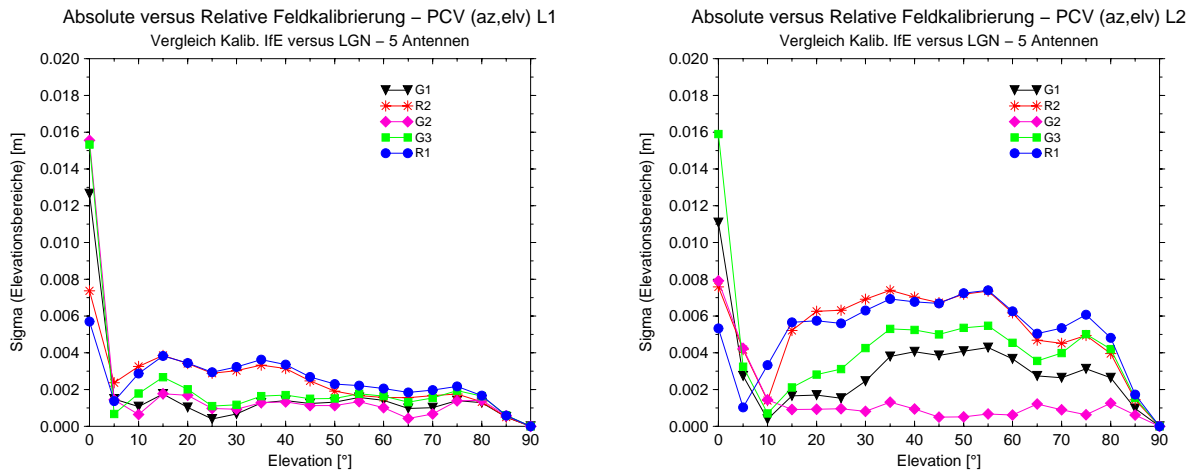


Abbildung 6.17: Vergleich azimutal- und elevationsabhängiger PCV aus zwei verschiedenen Feldkalibrierungen für fünf Antennen ( $L_1$ ,  $L_2$ ).

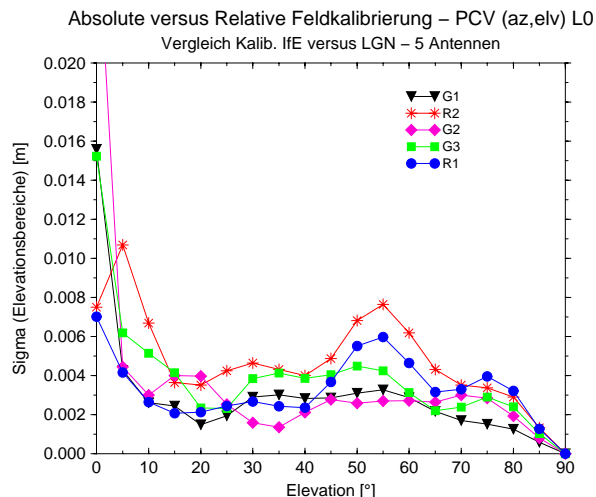


Abbildung 6.18: Vergleich azimutal- und elevationsabhängiger PCV aus zwei verschiedenen Feldkalibrierungen für fünf Antennen ( $L_0$ ).

um den Faktor 2-3 bessere Genauigkeiten als die Relativverfahren auf. Das Relativverfahren mit nur einer Antennendrehung (GIUB) fällt tlw. im Genauigkeitsniveau mehr ab. Das ist eine weitere Bestätigung dafür, dass für eine präzise hochauflösende PCV-Bestimmung eine optimale Abdeckung mit Beobachtungen vorliegen muss und Stationseffekte ausgeschlossen werden müssen. Der Einfluss der Referenzantenne (PCV und Multipath) ist in diesem Test unterschiedlich, da verschiedene Typen und Kalibrierungsorte genutzt wurden. Allerdings zeigt sich in Abbildung 6.17, dass die Antenne G2 das beste Genauigkeitsniveau aufweist. Diese Antenne war auch die Referenzantenne von der Kalibrierung LGN.

Die verbleibenden Resteffekte von Multipath und Überdeckung sind im absoluten Vergleich der Vollmodelle zu erkennen (Abbildung 6.19). Die 3D-Differenzen zeigen deutlich die im Relativverfahren durchgeführten Vierteldrehungen der Antennen. Zusammengefasst ergibt sich, dass besonders bei der Ableitung von hochauflösenden PCV mit einem Relativen Feldverfahren noch signi-



Tabelle 6.4: Standardabweichungen aus Differenzen der Kompletmodelle (bis  $10^\circ$  Elevationsmaske) zwischen verschiedenen Kalibrierungsverfahren und -orten am Beispiel einer geodätischen Antenne.

<b>Sigma [mm] G2 (bis <math>10^\circ</math> Elevation)</b>	IfE	GEO	TUD	LGN	GIUB	Signal
IfE	-	0.5	1.4	1.1	1.5	$L_1$
	-	0.8	2.1	0.9	2.7	$L_2$
	-	0.7	1.5	2.6	5.5	$L_0$
GEO	-	-	1.1	1.4	1.6	$L_1$
	-	-	1.5	1.2	2.1	$L_2$
	-	-	1.5	2.4	5.5	$L_0$
TUD	-	-	-	2.3	2.1	$L_1$
	-	-	-	2.4	1.6	$L_2$
	-	-	-	2.8	5.9	$L_0$
LGN	-	-	-	-	1.8	$L_1$
	-	-	-	-	3.0	$L_2$
	-	-	-	-	4.7	$L_0$
GIUB	-	-	-	-	-	$L_1$
	-	-	-	-	-	$L_2$
	-	-	-	-	-	$L_0$

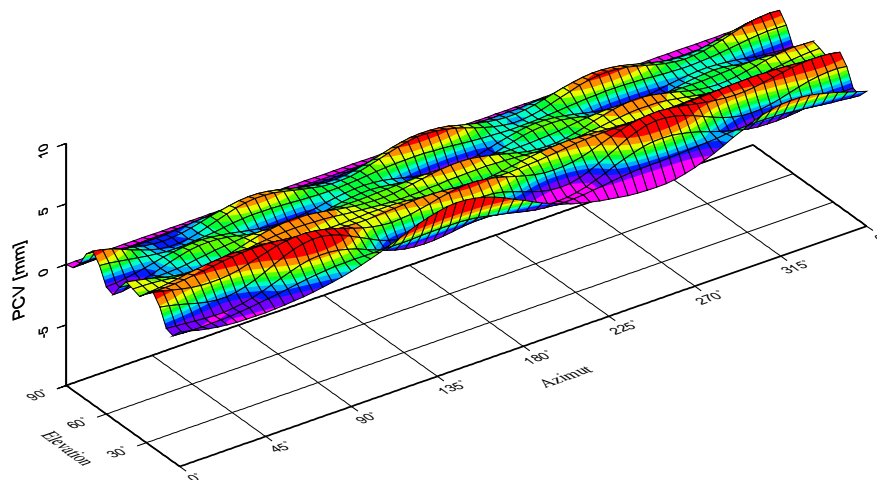


Abbildung 6.19: Differenz Vollmodell aus zwei Kalibrierungsmethoden.  $L_1$ -Ergebnisse vom IfE und vom Relativverfahren ( $4 \cdot 24$ h, jeweils  $90^\circ$  gedreht) am Kalibrierungsort TU Dresden.

fikante Restfehler auftreten. Diese werden nicht vollständig auflösbar sein, da die Überdeckung mit statischen Beobachtungen nicht zu verbessern ist und Multipath nicht völlig ausgeschaltet werden kann. Dies gilt vor allem für niedrige und hohe (Nordloch) Elevationsbereiche.

Die auftretenden Systematiken der Relativkalibrierung entfallen nicht vollständig durch eine Doppeldifferenz- bzw. undifferenzierte Auswertung. Dieses zeigt sich bei Mischungen von verschiedenen Kalibrierungsergebnissen in den Positionslösungen. In einem Versuch mit den Daten einer simulierten Zero-Baseline (Abbildung 6.20) wird das unabhängig von weiteren Einflüssen

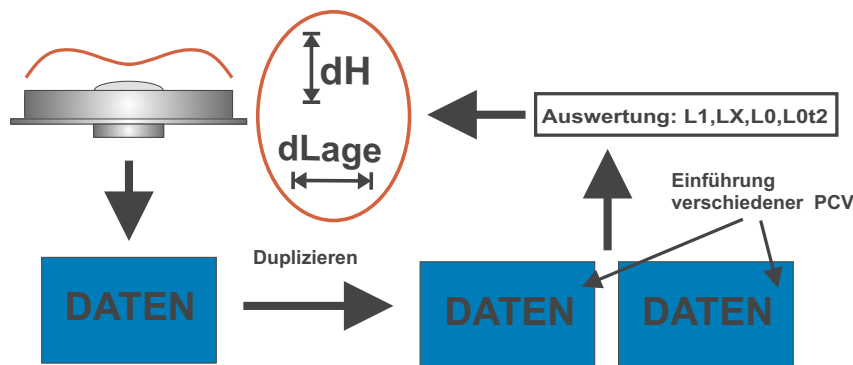


Abbildung 6.20: Versuchsaufbau zum Nachweis der Auswirkung von Mischungen verschiedener Kalibrierungsmodelle auf Absolut-Niveau. Simulation einer Zero-Baseline.

nachgewiesen. Nach einer Duplizierung realer, mit der jeweiligen individuellen Antenne gesammelten Beobachtungen werden beide Datensätze mit unterschiedlichen PCV für diese Antenne aufdatiert und ausgewertet. Die Abweichungen zum Soll von Null für die Basislinie zeigen reine Effekte der PCV-Modelle, unabhängig von Atmosphäre und Multipath. Bei den Auswertungen wurden verschiedene Signale ( $L_1$ ,  $L_X$ ,  $L_0$  etc.) und Auswertestrategien (Troposphärenparameter) genutzt. In Abbildung 6.21 werden jeweils PCV gleicher Verfahren (IfE versus GEO++<sup>®</sup>, TUD versus LGN) aber von verschiedenen Kalibrierungsorten eingeführt und die Positionslösung verglichen. Es zeigt sich, dass wie zu erwarten kaum Lageeffekte auftreten. In der Höhenkomponente ist vor allem bei der Relativkalibrierung und  $L_0$  mit einigen Millimetern Auswirkung zu rechnen, noch verstärkt durch die Schätzung von Troposphärenparametern. Dies ist auch in der genutzten Antenne R2 begründet. Die Rover-Antenne weist bereits ein höheres Rauschen für die Bestimmung der PCV auf, so dass sich auch Unterschiede zwischen LGN und TUD in der Zero-Baseline zeigen.

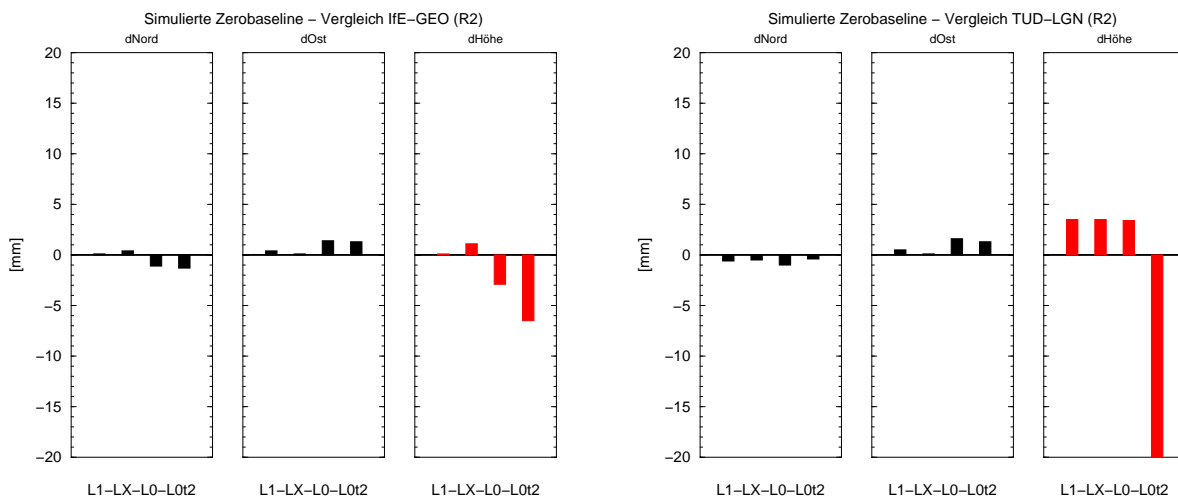


Abbildung 6.21: Simulierte Zero-Baseline. Einsatz verschiedener PCV aus identischen Kalibrierungsverfahren.

Prinzipiell passen gleiche Kalibrierungsmethoden in diesem Test sehr homogen zueinander. Bei der Mischung verhält es sich anders (Abbildung 6.22). Es können sogar Lagefehler von einigen

Millimetern (speziell  $L_0$ ) auftreten. Die Höhenkomponente der Zero-Baseline kann für die  $L_0$ -Lösung bei gleichzeitiger Schätzung eines Troposphärenparameters schon allein auf Grund der Mischung verschiedener PCV den Zentimeter erreichen oder überschreiten. Dies bestätigt, dass für hochpräzise Anwendungen identische Kalibrierungssätze eines Verfahrens genutzt werden müssen. Mögliche systematische Effekte in den Relativverfahren wie durch Fehlerfortpflanzung der Referenzantenne, durch Stationseffekte abhängig von der Örtlichkeit und der Modellierung zeigen sich bei Mischungen auf gleichem Bezugsniveau mit den PCV aus der Absoluten Feldkalibrierung in der Positionslösung.

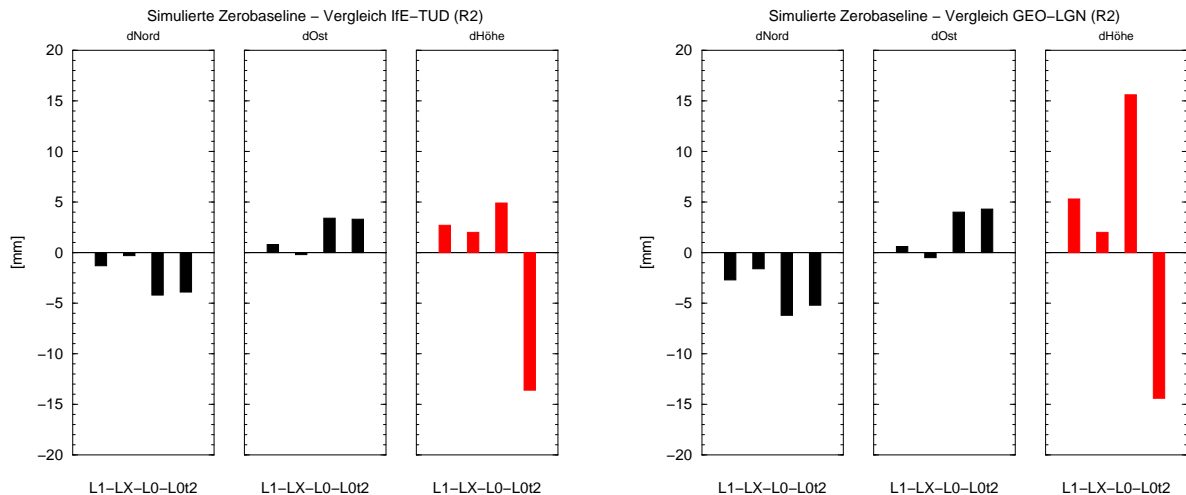


Abbildung 6.22: Simulierte Zero-Baseline. Einsatz verschiedener PCV aus unterschiedlichen Kalibrierungsverfahren.

## 6.4 Ein Vergleich absoluter PCV aus Kammer- und Feldkalibrierung

Ergebnisse aus Kammerkalibrierungen sind in operationellen GPS-Auswertungen kaum zu finden. Sie wurden (*Rothacher u. a. 1995*) und werden (*Rothacher 2001*) vor allem für grundlegende Tests im geodätischen Bereich eingesetzt, beispielsweise für die Abschätzung der Auswirkung der Einführung absoluter PCV auf die Netzlösung und auch als Vergleichsmessung für die Absolute Feldkalibrierung bzw. für andere Feldkalibrierungen (*Görres und Campbell 2000*).

Ein Vergleich zwischen Ergebnissen aus einer Kammerkalibrierung und der Absoluten Feldkalibrierung ist eine weitere Bestätigung für ein korrektes Kalibrierungsmodell bei den Roboter-messungen. Die Umrechnungen zwischen Bezugs-Niveaus von PCV, die Vergleiche mit relativen PCV, der Einsatz in realen Messungen und speziellen Tests (Kapitel 8) sind bereits Nachweise für deren Funktionalität. Kammermessungen sind jedoch ein vollkommen unabhängiges Verfahren aus elektrotechnischer Entwicklung, die gleiche Ergebnisse ergeben müssen. Die Vor- und Nachteile wurden bereits in Abschnitt 5.3 beschrieben, sodass man davon ausgehen kann, dass die PCV aus Absoluter Feldkalibrierung genauere Ergebnisse darstellen.

Eine Untersuchung wurde mit einer individuellen Trimble Choke Ring Antenne durchgeführt. Diese TRM29659.00 wurde in Hannover mit dem Roboter-Verfahren und in der Kammer am Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn kalibriert (*Campbell u. a. 1999*). In

dieser älteren Messkammer wird noch ein Großteil der Messungen manuell ausgeführt. Es finden dort keine operationellen Messungen mehr statt. Die elevationsabhängigen PCV wurden nur in einem Azimut bestimmt und somit als konstant über alle Azimute vorausgesetzt. Abbildung 6.23 zeigt die Differenzen zu den rein elevationsabhängigen PCV der Absoluten Feldkalibrierung nach vorheriger Umrechnung auf gemeinsamen Referenzpunkt und bei der von beiden Verfahren eingesetzten Zenitbedingung  $PCV^z = 0$ .

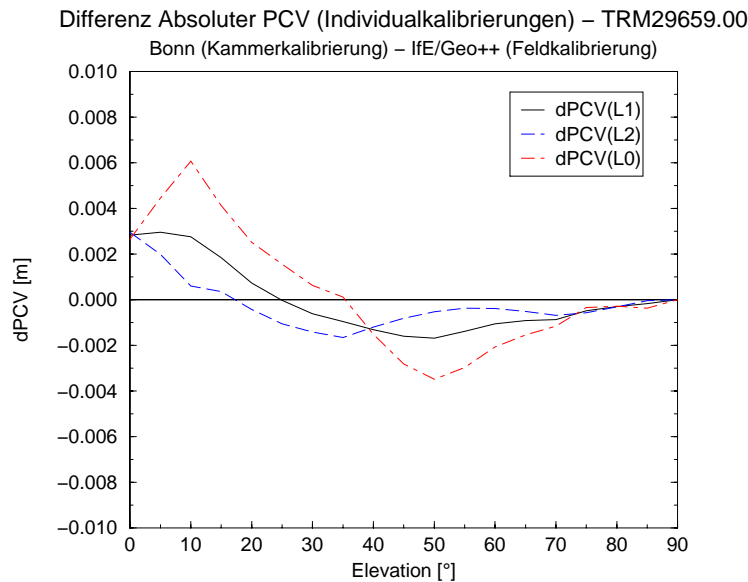


Abbildung 6.23: Vergleich Absoluter PCV, reines Elevationsmodell, der TRM29659.00 aus Kammer- (Bonn) und Feldmessungen (Hannover). Vergleich von individuellen Kalibrierungen für identische Antenne.

Der Verlauf der Differenzen zeigt teilweise geringfügige Spitzen. Begründet ist dies dadurch, dass die über den gesamten Elevationsbereich durchgehenden Kammermessungen von einer Papieraufzeichnung in 5°-Schritten digitalisiert wurden. Die größten Abweichungen der Originalsignale liegen im Bereich von  $\pm 2.5$  mm. Die Standardabweichung aus den Differenzen über die gesamte Hemisphäre liegt im Bereich von 1-1.5 mm (Tabelle 6.5). Für  $L_0$  ergeben sich maximale Differenzen bis 6 mm.

Ein Typvergleich wurde für die AOAD/ $M_T$  durchgeführt. Hierfür wurden dem IfE aktuelle Ergebnisse (*Schupler und Clark 2001*) aus der Messkammer der NASA am Goddard Space Flight Center (GSFC) in Greenbelt, Maryland, USA zur Verfügung gestellt. Die gerade modernisierte Kammer wird zum größten Teil computergesteuert betrieben (vgl. Abschnitt 5.3). Die genutzten elevationsabhängigen PCV wurden aus verschiedenen Azimuten abgeleitet. Die Differenzen wurden auf gleiche Weise wie im vorherigen Test erzeugt und sind in Abbildung 6.24 dargestellt. Die Differenzen zur Absoluten Feldkalibrierung sind glatt und homogen. Es musste keine punktuelle Digitalisierung durchgeführt werden. Es wurden die vollständigen Kurven berechnet. Aus diesem Grund und vor allem durch die modernere Kammer und zugehöriger Ausstattung ist der Vergleich geringfügig besser ausgefallen als der Vorversuch (Tabelle 6.5). Bei beiden fällt auf, dass für  $L_2$  ähnliche Genauigkeiten vorliegen. Dies war zu erwarten, da für elektrotechnische Messungen keine Qualitätsunterschiede im Empfang verschiedener Frequenzen vorliegen, außer möglicherweise durch Einflüsse einer fehlenden Feinabstimmung von Absorbern betreffend der Mehrwegeausbreitung.

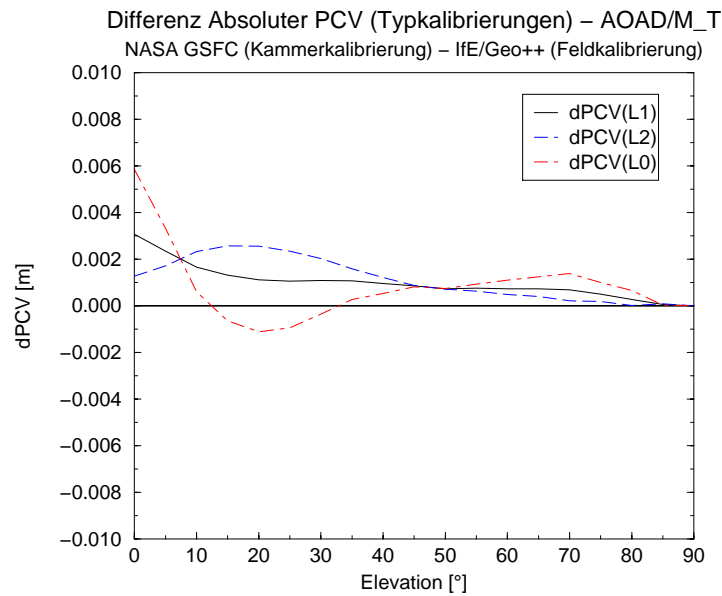


Abbildung 6.24: Vergleich Absoluter PCV, reines Elevationsmodell, der AOAD/M\_T aus Kammer- (NASA GSFC) und Feldmessungen (Hannover). Vergleich von Typkalibrierungen.

Wie auch Vergleiche zwischen Kammer- und Relativkalibrierungen (*Görres und Campbell 2001*), so zeigen bereits durchgeführte Überprüfungen der Absoluten Feldkalibrierung durch andere Gruppen (*Rothacher 2001*), dass die Ergebnisse zwischen den vollkommen unabhängigen Verfahren grundsätzlich übereinstimmen. Man erhält eine zusätzliche Bestätigung für das Absolute Feldverfahren. Die Differenzen unterscheiden sich nicht stark von den Vergleichen mit Relativverfahren, wobei diese für die rein elevationsabhängigen relativen PCV des Feldverfahrens etwas kleiner sind (Tabelle 6.3). Trotzdem bleibt festzuhalten, dass Kalibrierungen der Phasenvariationen mit künstlichen Signalen und den originalen GPS-Signalen zueinander kompatibel sind. Es standen für diese Untersuchungen keine weitere Typen - vor allem azimuthal variierende Typen und Rover-Antennen - zur Verfügung.

Tabelle 6.5: Standardabweichungen aus Differenzen zwischen Absolutem Feld- und zwei Kammerverfahren. Vergleich TRM29659.00 (MPIfR) und AOAD/M\_T (GSFC).

<b>Sigma [mm]</b> aus dPCV vom Zenit	IfE - MPIfR bis 0° Elv.	IfE - MPIfR bis 10° Elv.	IfE - GSFC bis 0° Elv.	IfE - GSFC bis 10° Elv.
$L_1$	1.5	1.2	1.2	0.9
$L_2$	1.1	0.8	1.4	1.4
$L_0$	2.6	2.5	1.7	0.8

## Kapitel 7

# Untersuchungen zu Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen

Mit der Absoluten Feldkalibrierung steht erstmals ein hochauflösendes Verfahren zur Verfügung, um das große Spektrum der zur Zeit eingesetzten GPS-Antennen im Detail zu untersuchen und Phasenvariationen abzuleiten. Es können Einflussfaktoren wie Grundplatten und Radome näher betrachtet und die Auswirkungen auf die PCV quantifiziert werden. In diesem Kapitel werden beispielhaft die Kalibrierungsergebnisse von verschiedenen Antennentypen (Empfangelemente, Form, Aufbau, Typ) vorgestellt. Bei den gewählten Beispielen werden nicht dezidiert spezielle Firmen ausgewählt. Die vorgestellten Antennen sind den vorhandenen Kalibrierungsergebnissen am IfE entnommen und stehen jeweils beispielhaft für bestimmte Untersuchungen. Aus den Ergebnissen lassen sich auch Aussagen über den Einsatz bestimmter Antennentypen und die Auswirkungen auf die hochpräzise Positionsbestimmung treffen.

### 7.1 Phasenzentrumsvariationen von Rover-Antennen und azimutale PCV

Ein großer Teil der im Feld eingesetzten Antennentypen gehört zu den Rover-Antennen. Diese werden mittlerweile auch als Zweifrequenz-Modelle angeboten und verwendet. Herausragendes Merkmal dieser Typen ist eine leichte, sehr kompakte Bauweise, da ein Einsatz für Echtzeitanwendungen im Feld vorgesehen ist, beispielsweise auf Lotstäben zusammen mit Rucksackausrüstung. Geprägt sind die Typen vor allem durch die kaum vorhandenen zusätzlichen Grundplatten. Dadurch ergeben sich zum Teil verschlechterte Empfangseigenschaften. Die Phasenzentrumsvariationen werden hauptsächlich durch Form, Art und Größe der Kombination Empfangsteil und Gehäuse dominiert.

Die teilweise leicht verminderte Empfangsqualität lässt sich an der Wiederholungsgenauigkeit der PCV-Kalibrierung erkennen. So zeigen die PCV von Rover-Antennen bei der Absoluten Feldkalibrierung eine im Vergleich mit anderen geodätischen Antennen etwas höhere Streuung bei wiederholter unabhängiger Kalibrierung (Abbildung 6.5). Der Vergleich zwischen Absoluter und Relativer Feldkalibrierung zeigt ähnliche Ergebnisse, die auf erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Stationseffekten schließen lassen (Abbildungen 6.17 und 6.18). Mittlerweile geht der Trend

bei den Herstellern dahin, einerseits kompakte Antennensysteme zu entwerfen, andererseits aber hochwertige Empfangselemente zu nutzen und möglichst dem Empfangsverhalten geodätischer Antennen zu entsprechen (*Tatarnikov 2001*). Die sehr stabile Wiederholungsgenauigkeit zum Beispiel für Choke Ring Antennen wurde bereits im Vorkapitel nachgewiesen (Abbildung 6.9). Im Vergleich dazu sind die Streuungen der minimalen und maximalen Abweichungen von Einzelkalibrierungen einer Rover-Antenne gegenüber einem Gesamtmittel größer, besonders mit abnehmender Elevationsmaske Richtung Antennenhorizont und für das unter A-S schwächere  $L_2$ -Signal. Dies wird deutlich am Beispiel der Antenne LEIAT502 in Abbildung 7.1.

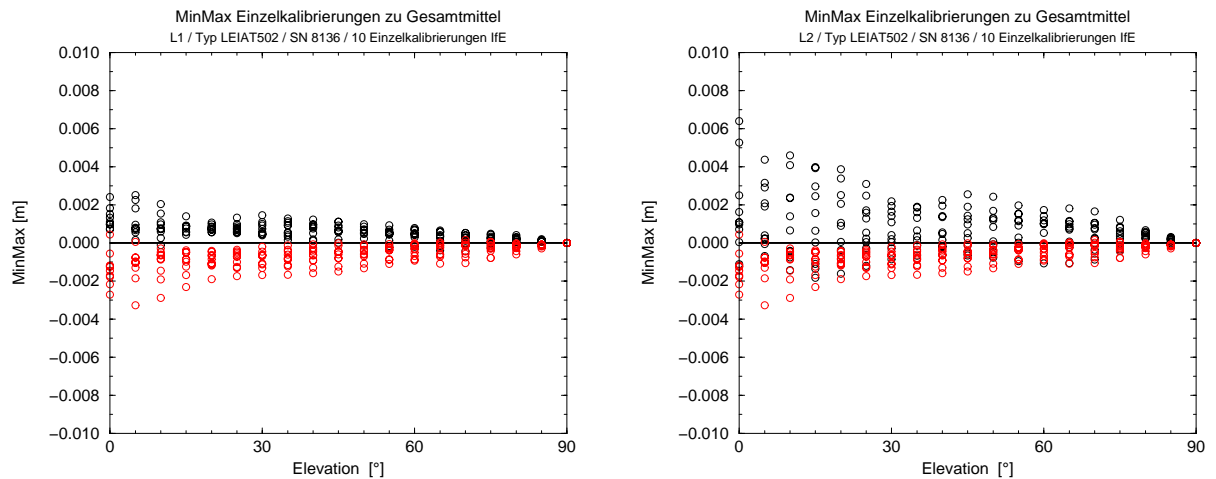


Abbildung 7.1: Minimale und maximale Abweichungen einzelner PCV-Werte aus Einzelkalibrierungen bezüglich des Gesamtmittels (LEIAT502). Beispiel für kompakte Rover-Antennen.

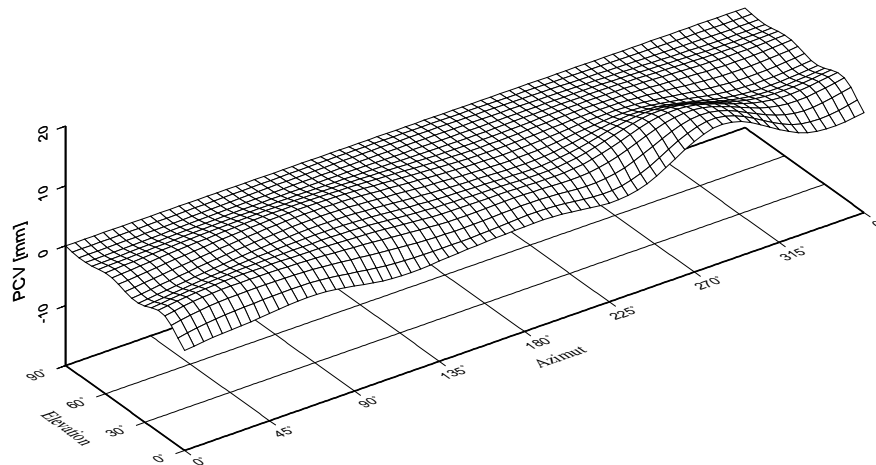


Abbildung 7.2: Phasenzentrumsvariationen der LEIAT502 ( $L_1$ ).

Auf der anderen Seite ergibt sich aus der Bauweise einiger Rover-Antennen ein spezieller Vorteil. Der sehr geringe Grundplattendurchmesser, zum Beispiel von nur ca. 16 cm für die LEIAT502, ist ein Grund für kleine PCV. Das Empfangsverhalten ist dadurch dem einer Nullantenne (Abschnitt 6.2) sehr ähnlich. Dies bietet die Vereinfachung, bei Ausstrahlung der Nullantenne in Referenznetzen für Anwendungen im Zentimeterbereich auf die Korrektur der Rover-Antenne

u.U. verzichten zu können. Die absoluten  $L_1$ -PCV mit Bezug auf den mittleren Offset - somit um den PCV-Effekt des individuellen Offsets befreit - der LEIAT502 werden in Abbildung 7.2 dargestellt. Die kleinen und kaum vorhandenen Elevationsabhängigkeiten liegen im Bereich von 1-3 mm. Für  $L_0$  hingegen wird am Horizont der Zentimeter erreicht. Für den Großteil der Antennenhemisphäre liegen die  $L_0$ -PCV jedoch im Bereich weniger Millimeter. Andere qualitativ gute Rover-Antennen (Zweifrequenz) wie beispielsweise die TRM39105.00, die JPSLEGANT\_E u.a. liegen in einem ähnlichen Bereich mit minimalen Lage-Offsets, kaum vorhandenen azimuthalen PCV und insgesamt kleinen Variationen.

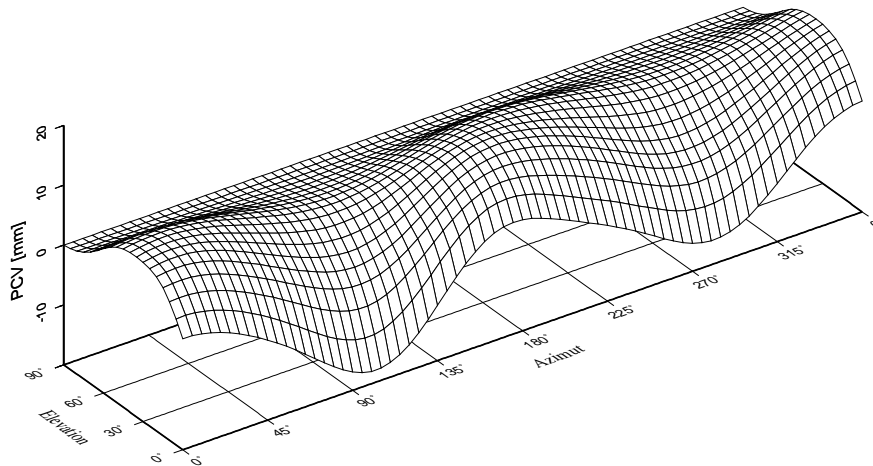


Abbildung 7.3: Phasenzentrumsvariationen der ASH700700.B ( $L_1$ ).

Eine andere Eigenschaft der PCV von kompakt gebauten Antennen wird bei Typen mit nicht runden bzw. eckigen Gehäusekonstruktionen ersichtlich. Hier entstehen durch die asymmetrischen Formen azimuthale PCV, deren Kongruenz zu Gehäuse- bzw. Grundplattenkanten offensichtlich ist.

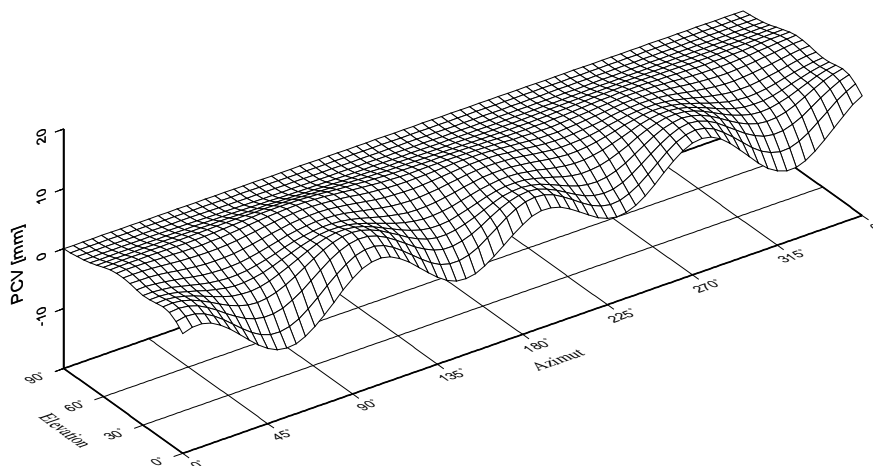


Abbildung 7.4: Phasenzentrumsvariationen der JPSMARANT\_GGD ( $L_1$ ).

Ein Beispiel ist die Ashtech Marine Antenne (ASH700700.B) mit ihrer leicht elliptischen Form,



die zwischen Minima bzw. Maxima der PCV einen Abstand von jeweils  $180^\circ$  aufweist (Abbildung 7.3). Ihre etwas größere Grundplatte (ca. 24 cm Durchmesser) erzeugt zusätzlich eine ausgeprägtere Elevationsabhängigkeit. Die Minima und Maxima bei den Azimuten  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  schwanken am Horizont für  $L_1$  zwischen  $-1.7$  cm und  $-0.1$  cm, bei  $10^\circ$  Elevation immer noch zwischen  $-0.8$  cm und  $0.4$  cm. Für  $L_0$  ergibt sich eine Variation von fast  $\pm 1$  cm am Horizont. Die Variationen liegen zwischen  $-2.8$  cm und  $-1.1$  cm, bei  $10^\circ$  noch zwischen  $-1.2$  cm und  $0.4$  cm. Diese Variationen sind nicht zu vernachlässigen und machen sich vor allem in Kurzzeitbeobachtungen bemerkbar, da hier nur ein Ausschnitt der Satellitenkonstellation genutzt werden kann (Kapitel 8).

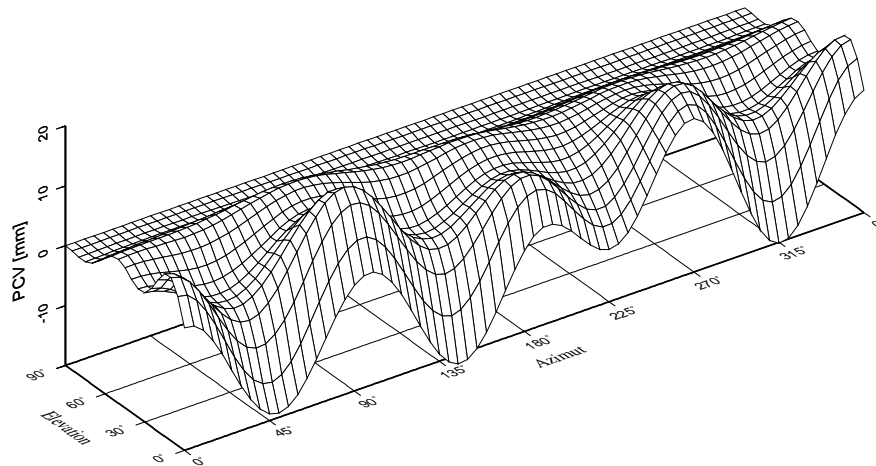


Abbildung 7.5: Phasenzentrumsvariationen der JPSMARANT\_GGD ( $L_0$ ).

Derartige azimutale Variationen sind signifikant mit der Absoluten Feldkalibrierung zu bestimmen und stellen tatsächlich ein antennenspezifisches und umgebungsunabhängiges *phase pattern* dar. So fallen diese PCV bei der JPSMARANT\_GDD (Abbildung 7.4) beispielsweise etwas geringer aus. Die azimutalen Variationen korrespondieren dabei mit den Kanten bzw. Ecken des sehr kleinen quadratischen Gehäuses (Durchmesser nur ca. 14 cm). Die Minima und Maxima für  $L_1$  am Horizont variieren hier noch mit mehr als  $\pm 0.6$  cm. Bei den  $L_0$ -PCV (Abbildung 7.5) wird am Horizont noch ungefähr  $\pm 0.8$  cm erreicht.

Als ein weiteres exemplarisches Beispiel für den Einfluss der Gehäuseform und der Grundplatte werden im Folgenden die PCV der Trimble Kompaktantenne (TRM22020.00-GP) vorgestellt. Das Empfangselement befindet sich mit dem Vorverstärker in einem kastenförmigen Gehäuse mit ungefähr 19 cm Kantenlänge (Abbildung 7.6), mit der Möglichkeit zum Anbringen einer großen Grundplatte. Um einen weiteren Nachweis des Auflösungsvermögens der Absoluten Feldkalibrierung unabhängig von Umgebungseinflüssen zu zeigen und um das tatsächliche Vorhandensein der azimutalen PCV aufzuzeigen, wurde die Antenne mehrmals unabhängig kalibriert und dabei jeweils  $45^\circ$  verdreht in den Roboter eingespannt.

In Abbildung 7.7 werden zwei Ergebnisse qualitativ verglichen. Beide Kalibrierungssätze - hervorgehend aus der Normalausrichtung (links) und der verdrehten Ausrichtung (rechts) - zeigen unabhängig voneinander die gleichen azimutalen Variationen. Die Minima und Maxima sind lediglich um genau  $45^\circ$  gegeneinander verdreht, entsprechend der Einspannung bezüglich der Ausgangsposition im Roboter. Ein rechnerisches Zurückdrehen der PCV der rotiert eingespannten Antenne und ein anschließender Vergleich mit den Originalergebnissen ergibt keine signifikanten



Abbildung 7.6: Eckige Form der TRM22020.00-GP

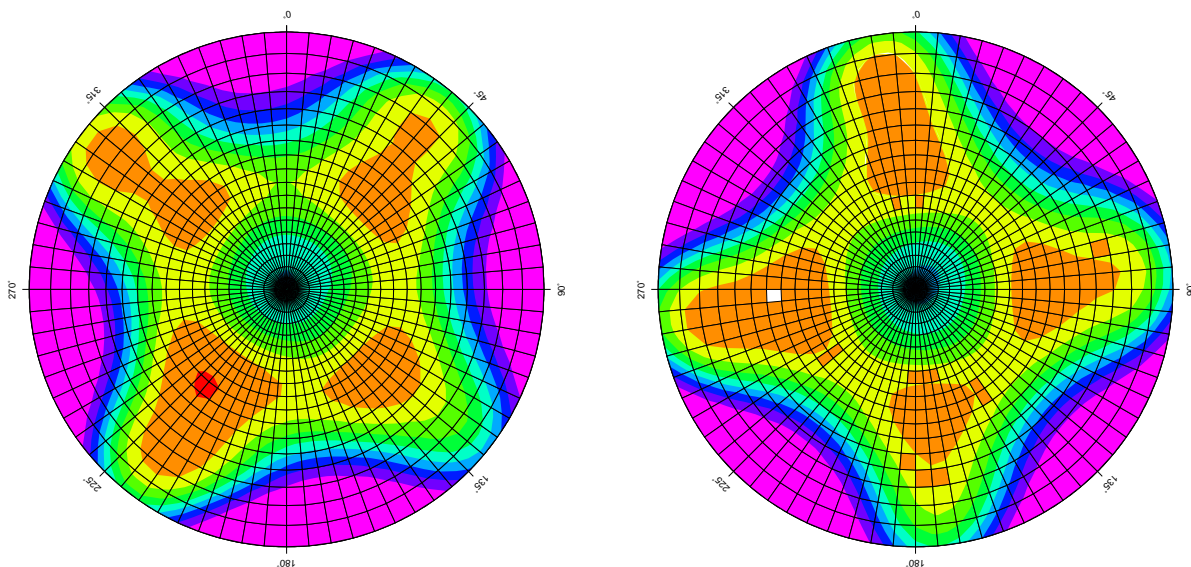


Abbildung 7.7: Qualitativer Vergleich der Kalibrierungen der TRM22020.00-GP in Normalausrichtung und 45°-Grad verdreht. Ergebnisse zeigen identisches, nur gegeneinander rotiertes *phase pattern*.

Differenzen, sondern lediglich die bereits bekannten Wiederholungsgenauigkeiten für das Verfahren (Abbildungen 6.3 und 6.4).

## 7.2 Einfluss einer Grundplatte auf die PCV

Das im vorherigen Abschnitt beschriebene azimutale Muster der Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00-GP wird für das  $L_1$ -Signal in Abbildung 7.8 nachgewiesen. Die Minima und Maxima im Abstand von 45° korrespondieren mit den Ecken und Längsseiten des Gehäuses, allerdings ca. um 5-10° leicht versetzt, was möglicherweise auf ein nicht exakt parallel zu den Gehäusekanten eingesetztes Empfangselement bzw. eine nicht ganz symmetrische Speisung schließen lässt. Es treten bereits für  $L_1$  deutliche azimutale Variationen im Bereich von  $\pm 0.8$  cm am Horizont

auf.

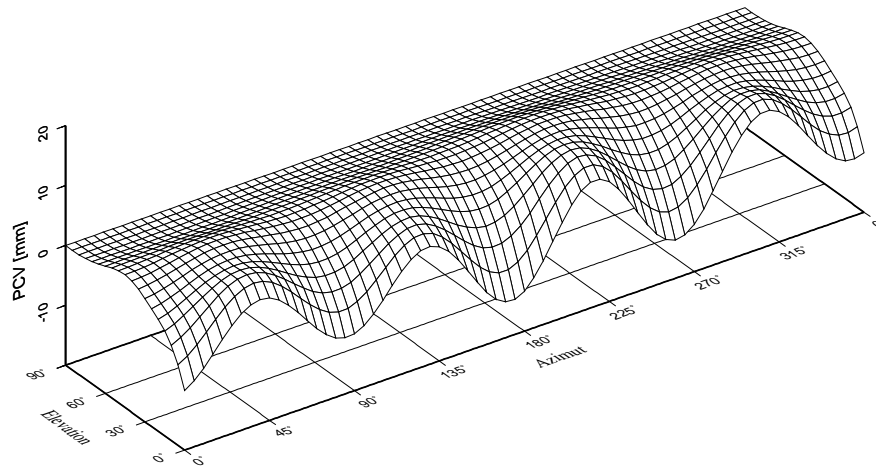


Abbildung 7.8: Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00-GP ( $L_1$ ).

Werden die PCV neben dem Effekt der Offsets auch um die rein elevationsabhängigen PCV befreit, so verbleiben nur die azimutalen PCV-Anteile (Abbildung 7.9). Dadurch werden diese Anteile und ihre Größenordnung besonders deutlich. Beim Einsatz der Antenne sollte dieser systematische Fehler in jedem Fall berücksichtigt werden. Für  $L_0$  variieren die PCV in einem Bereich von ca. 2.6 cm.

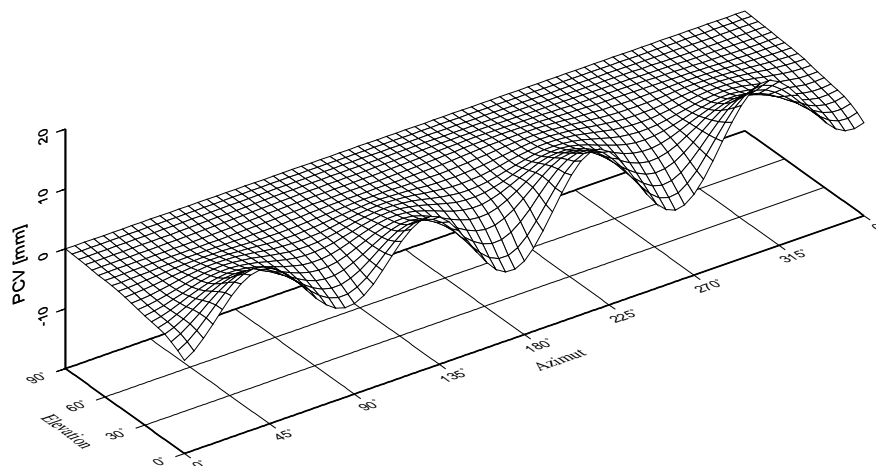


Abbildung 7.9: Rein azimutale Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00-GP ( $L_1$ ).

Der Einfluss von Veränderungen im Nahfeld der Antenne auf die Phasenzentrumsvariationen soll anhand der Hinzunahme verschiedener Grundplatten an die TRM22020.00-GP dargestellt werden. Die Firma Trimble bietet für ihre Antennen einen konischen Dome an, der eine separate Grundplatte enthält, die unterhalb der eigentlichen Antenne anzubringen ist. In einem ersten Versuch wurde diese Grundplatte (ohne Dome) unter die Kompaktantenne montiert (unterhalb ARP) und die Veränderungen der PCV dokumentiert. Für  $L_1$  (Abbildung 7.10) und ebenso für

andere Signale ist eine deutliche Veränderung zu erkennen. Die Offsets sind normalerweise nicht für eine Beschreibung des gesamten Antennenverhaltens repräsentativ. Eine starke Offsetänderung für die Höhenkomponente - um beispielsweise 0.7 cm für  $L_1$  - ist aber bereits ein Indikator dafür, dass die runde und zentrisch angebrachte Grundplatte einen deutlichen Effekt auf die elevationsabhängigen PCV haben muss. Für hohe Elevationen nahe des Zenitbereichs ergibt sich tatsächlich ein ausgeprägteres elevationsabhängiges Maximum. In niedrigen Elevationsbereichen hingegen verbleibt das oben beschriebene typische azimutale  $90^\circ$ -Muster der TRM22020.00-GP. Dies ist auf den großen Abstand der Grundplatte zum Empfangselement zurückzuführen.

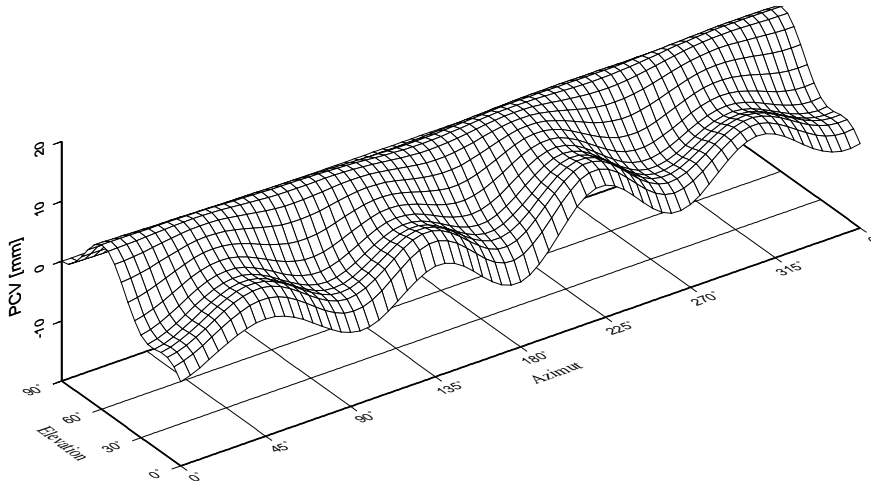


Abbildung 7.10: Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00-GP plus Grundplatte des TCWD-Domes ( $L_1$ ). Zusätzliche Grundplatte unterhalb ARP.

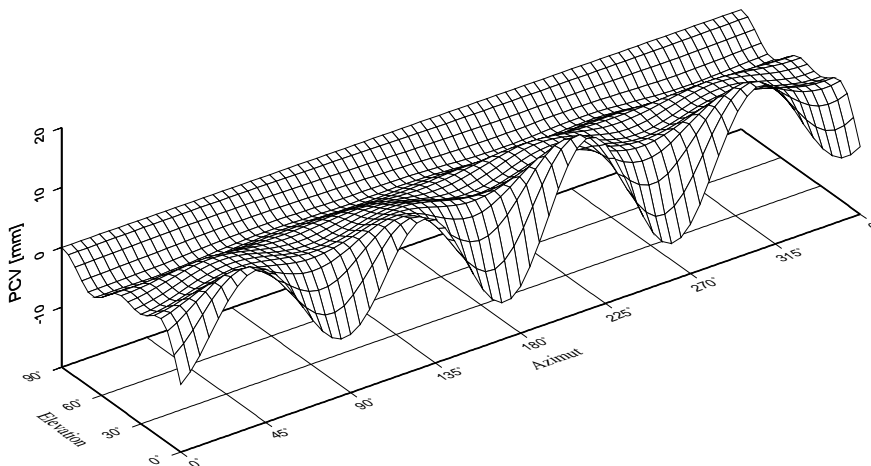


Abbildung 7.11: Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00-GP plus Grundplatte des TCWD-Domes ( $L_1$ ). Der Abstand zwischen Antenne und zusätzlicher Grundplatte wurde vergrößert.

Dies lässt sich durch einen weiteren Test nachweisen, in dem der Abstand der separaten Grundplatte durch einen Zapfen um ca. 20 cm vergrößert wird. Es wird ersichtlich, dass die runde

Grundplatte mit zunehmendem Abstand vom Empfangselement einen gänzlich anderen Einfluss vor allem auf die elevationsabhängigen PCV aufweist. Unterhalb  $20^\circ$  Elevation sind deutlich die azimuthalen Anteile der ursprünglichen PCV zu erkennen (Abbildung 7.11). Im hohen Elevationsbereich sind die steilen elevationsabhängigen Gradienten einer nahe am Empfangselement liegenden Grundplatte wesentlich abgeflacht, sogar mit einer anderen Richtung des Anstieges. Der Unterschied im  $L_1$ -Höhen-Offset zu den Ergebnissen mit der direkt unterhalb des ARP angebrachten Grundplatte beträgt fast 1.5 cm.

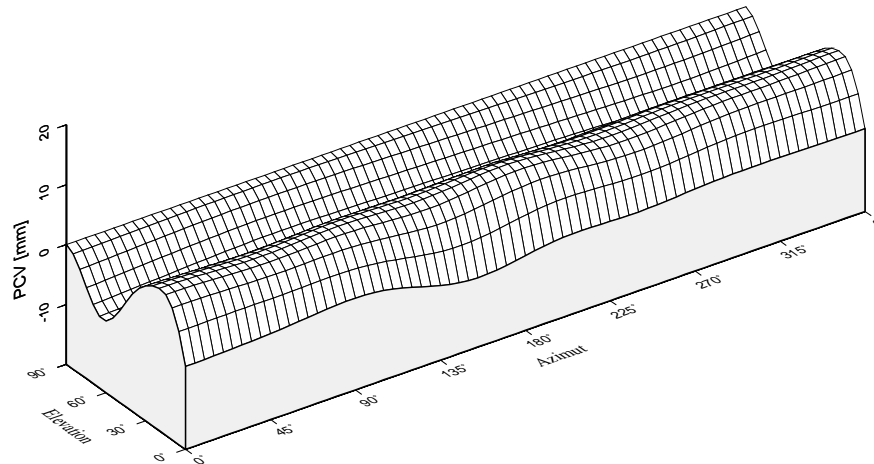


Abbildung 7.12: Phasenzentrumsvariationen der TRM22020.00+GP ( $L_1$ ). Nutzung der Originalgrundplatte.

Die komplette Auflösung der starken azimuthalen Effekte im *phase pattern* ergibt sich durch die Nutzung der Originalgrundplatte (Durchmesser 48 cm). Eine radikale Änderung der PCV wird durch die Montierung in Höhe des Empfangselementes ausgelöst. Man erhält das typische Muster aller ähnlich gebauten Trimble Antennen mit ausgeprägtem rein elevationsabhängigen Minimum und Maximum sowie einem sehr steilen Gradienten (Abbildung 7.12), der im hohen Elevationsbereich bis zu  $1 \text{ mm}/^\circ$  für  $L_0$  beträgt. Identische Effekte zwischen montierter und nicht montierter Grundplatte treten bei anderen ähnlich gebauten Antennen auf, zum Beispiel der Trimble Microcentered (TRM33429.00-GP und TRM33429.00+GP) mit der gleichen rechteckigen Form des Gehäuses und abnehmbarer Grundplatte.

An einem weiteren Beispiel wird deutlich, dass selbst geringfügige Veränderungen der Abstände innerhalb Gehäuse, Empfangsteil und Grundplatte bzw. Choke Ring Auswirkungen auf die PCV haben, die für hochpräzise Anwendungen nicht zu vernachlässigen sind. Verschiedene Anwendungen bzw. Tests mit Choke Ring Antennen der Firma Javad (JPSREGANT\_DD\_E, JPSREGANT\_SD\_E) haben leichte Einschränkungen des Empfangsverhaltens für  $L_2$  unterhalb  $10^\circ$  Elevation ergeben, was herstellenseitig bestätigt und wegen der schlechteren Datenqualität in diesem Bereich bewusst mit einem sehr geringen Gewinn (*gain*) unterhalb  $10^\circ$  Elevationsmaske herbeigeführt wurde (Jackson u.a. 2000). Hersteller- und nutzerseitig wurden Versuche durchgeführt, bei dem das Empfangselement im Gehäuse angehoben wurde, um das Tracking-Verhalten zu beeinflussen. Die Effekte auf die PCV wurden u.a. mit der Absoluten Feldkalibrierung nachgewiesen. Abbildung 7.13 zeigt die Differenzen der PCV nach Anheben des Patches um ca. 1 cm für beide Originalfrequenzen. Ein deutlicher Effekt wird vor allem für  $L_2$  ersichtlich, wobei die PCV-Änderungen mit einem sehr steilen Gradienten in der Größenordnung der Veränderungen

des Patches liegen. Für  $L_1$  ergeben sich kleinere Differenzen im Bereich von 1-3 mm. Die stärkere Veränderung für  $L_2$  könnte an der speziellen Konstruktion des Patches liegen, bei dem der Microstrip für  $L_1$  und  $L_2$  mit sog. *parasitic elements* aus zwei konzentrischen Ringen aufgebaut wird (vgl. Abschnitt 4.2.3).

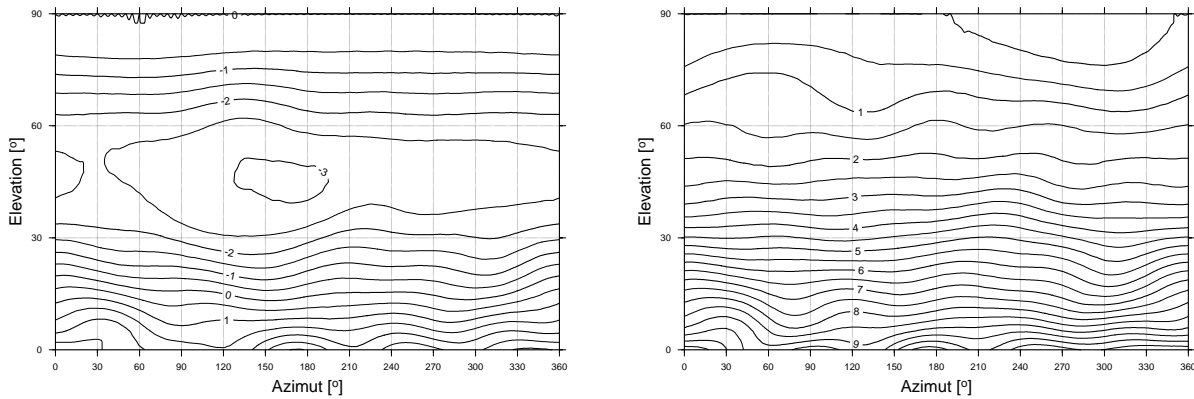


Abbildung 7.13: Differenz der PCV (JPSLEGANT\_SD\_E) nach Hochsetzen des Empfangselementes,  $L_1$  (links) und  $L_2$  (rechts).

Alle hier beispielhaft angegebenen Untersuchungen machen deutlich, dass Veränderungen im Nahfeld der Antenne starke Auswirkungen auf das Phasenempfangsverhalten haben. Dazu gehören die Form des Gehäuses ebenso wie die genutzte Grundplatte jeweils in Verbindung mit der Konstruktion des Empfangselementes. Die Antennenteile mit der größten Ausdehnung in der Nähe des Empfangselementes haben einen dominierenden Einfluss auf die PCV, zum Beispiel eine Grundplatte. Bei kleinen Antennenkonstruktionen hingegen kann auch das Gehäuse selbst den größten Einfluss zeigen (Beispiel Rover-Antennen). Selbst kleine Veränderungen von Abständen zum Empfangselement - speziell in der Höhe - ergeben Verschiebungen der Offsets und PCV. Die Ergebnisse zeigen die Wichtigkeit einer hochauflösenden und umgebungsunabhängigen Antennenkalibrierung für hochpräzise Anwendungen. Zudem wird deutlich, dass auch herstellerseitig eine hohe Präzision der Montierung erforderlich ist, anderenfalls müssen individuelle Kalibrierungen durchgeführt werden.

### 7.3 Einfluss einer Dome-Konstruktion auf die PCV

Grundsätzlich dient ein Dome, deutsche Bezeichnung auch Radom, aus einem dielektrischen Material als Schutz der Antenne gegen äußere Einflüsse wie Witterung etc. bei gleichzeitig möglichst vernachlässigbar kleinen Effekten auf das elektrische Empfangsverhalten. Für Navigationsanwendungen ist dies gewährleistet. Im geodätischen Bereich werden Domes vor allem auf Permanentstationen eingesetzt. Im Bereich der hochpräzisen Positionsbestimmung kann nicht mehr von einem unveränderten Phasenempfangsverhalten ausgegangen werden, wenn zusätzliche Domes eingesetzt und Genauigkeiten im Millimeterbereich angestrebt werden. Im Vorabschnitt wurde deutlich, dass sich Veränderungen nahe des Empfangselementes auf die PCV auswirken.

Grundsätzlich kann ein Dome das elektrische Verhalten einer Antenne auf Grund von Reflexionen und Refraktion zwischen bzw. an unterschiedlichen Medien und durch generelle Verluste im Dome-Material verändern (Huddleston und Bassett 1993). Dadurch kann das elektrische Verhalten gestört werden, zum Beispiel mit Veränderungen bei Gewinn, Polarisation, Stärke von

Nebenkeulen etc. Prinzipiell können diese Effekte berechnet werden, indem lokal jeder Ort der gekrümmten Dome-Wand durch eine planare dielektrische Fläche repräsentiert wird, oder indem auf Messstrecken Untersuchungen vorgenommen werden.

Bei Bodenstationen ist die Konstruktion eines Radoms (Material, Design der Wand, Krümmung) hauptsächlich abhängig von äußeren Faktoren wie Temperaturen, Feuchtigkeit, Vibrationen, Wind, Sand, Regen, Schnee, Eis, Belastungen etc. Daraus ergeben sich eine Vielfalt möglicher Materialien (Plastikarten, Lamine, keramische Materialien) und zylindrischen, sphärischen bzw. Kombinationsformen daraus. Das Transmissions-Verhalten der Wandstrukturen sollte weitgehend unabhängig von Polarisation und Einfallswinkel sein. Dazu dürfen beispielsweise die Wandstärken nur minimal variieren, und es muss ein möglichst schmales Frequenzband für die Nutzung definiert werden. Reflexionen können das VSWR im Speisesystem negativ beeinflussen. Weitere Details werden u.a. in *Huddleston und Bassett (1993)* dargestellt.

Die Auswirkung auf die PCV von Antennen für den geodätischen Bereich der hochpräzisen GPS-Nutzung wird im Folgenden durch die Kalibrierung verschiedener Dome-Typen mit dem Verfahren der Absoluten Feldkalibrierung untersucht. Abbildung 7.14 zeigt drei Beispiele für mögliche Dome-Formen, die prinzipielle Unterschiede der verfügbaren Typen zeigt. Neben der Form, dem Material und der Größe unterscheiden sich verschiedene Radome vor allem durch die Art der Montierung (Schrauben, separate Grundplatte etc.).



Abbildung 7.14: Beispiele für verschiedene Dome-Konstruktionsformen. Von links: Ashtech (SNOW), Trimble (TCWD), SCIGN-Dome klein (SCIS).

Die hier dargestellten PCV-Differenzen zwischen Ergebnissen jeweils mit und ohne Radom wurden beispielhaft aus den vorhandenen IfE-Kalibrierungen genommen und beziehen sich auf eine Trimble Dome-Konstruktion (TCWD), einen Ashtech Dome (SNOW), einen Leica Dome (LEIC), einen Novatel Dome (NOKE) und einen SCIGN Dome (SCIS). Die Abkürzungen wurden der IGS-Namenskonvention entnommen. Die Abbildungen 7.15 und 7.16 zeigen rein elevationsabhängige Differenzen der PCV verschiedener Antennen mit und ohne den jeweiligen Dome für  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_0$ . Auf die kompletten 3D-Differenzen wurde an dieser Stelle verzichtet, da durch die grundsätzlich symmetrisch aufgebauten Radome kaum azimuthale bzw. Lage-Effekte auftreten.

Bei den Differenzen sind drei Gruppen von verschiedenen Effekten zu erkennen. Die Domes SNOW, LEIC und NOKE, alle mit direkter Montierung ohne zusätzliche Grundplatte und schräger Wandung (konische Form), zeigen den geringsten Einfluss im Bereich von  $\pm 1$ -2 mm für die Originalfrequenzen und nur geringfügig größer für  $L_0$  im Bereich von maximal  $\pm 2$ -3 mm. 3D-Ergebnisse weisen alle ein sehr uneinheitliches Verhalten am Horizont auf (*Schmitz 2001*), was auf Effekte durch die jeweilige Montierung und Verschraubung hinweist.

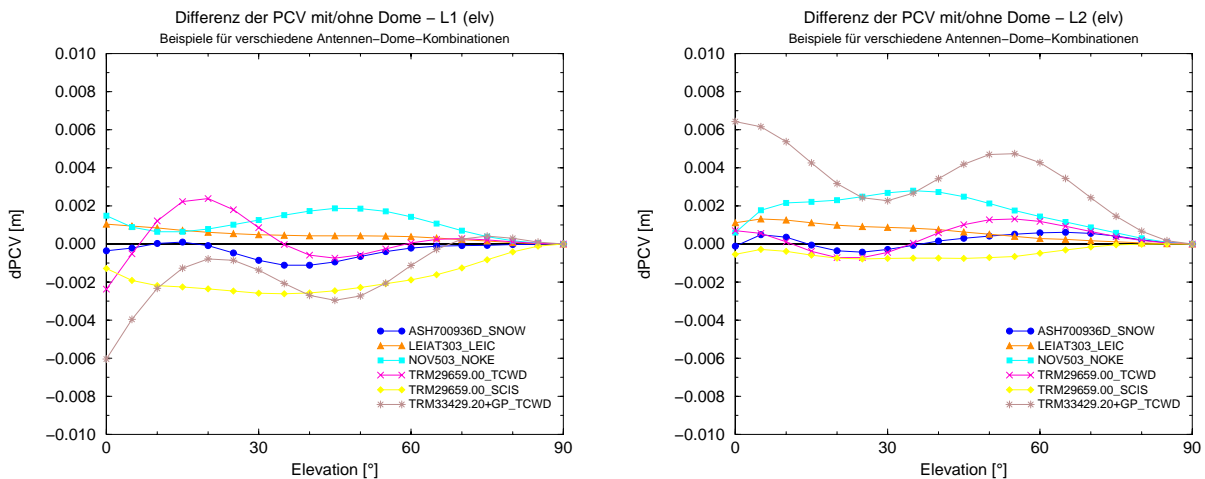


Abbildung 7.15: Einfluss einer Domekonstruktion auf die PCV. Differenzen ( $L_1$ ,  $L_2$ ) mit/ohne Dome für verschiedene Antennen-Dome-Kombinationen.

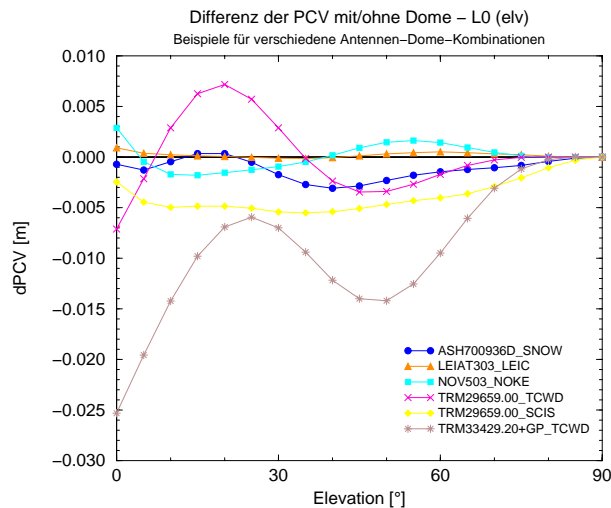


Abbildung 7.16: Einfluss einer Domekonstruktion auf die PCV. Differenzen ( $L_0$ ) mit/ohne Dome für verschiedene Antennen-Dome-Kombinationen.

Die größten Auswirkungen zeigen die beiden Antennen von Trimble mit der TCWD-Konstruktion (TRM33429.20+GP, TRM29659.00). Wie bereits im Vorabschnitt beschrieben, ist dies vor allem durch die separate Grundplatte bedingt, die klare elevationsabhängige Auswirkungen mit stärkeren Gradienten zeigt. Die Größenordnung liegt im Bereich von bis zu  $\pm 3$  mm für  $L_1$ ,  $L_2$  und bis zu 2.5 cm für  $L_0$ .

Eine dritte Gruppe repräsentiert der kleine SCIGN-Dome (SCIS). Der SCIS-Dome hat grundsätzlich eine sphärische Form und wird aus einem sehr stabilen Kunststoff gefertigt. Stahlschrauben am unteren Ring befestigen den Dome an der Antenne (Choke Ring). Die PCV verändern sich im Gegensatz zu anderen Typen wesentlich, vor allem im hohen Elevationsbereich vom Zenit bis ca.  $60^\circ$  mit einem starken Gradienten (Abbildung 7.17). Am Antennenhorizont ist auch hier ein eher uneinheitliches Bild zu erkennen, vermutlich auf Grund der Befestigung und der doppelten Kunststoffwulst an dieser Stelle. Die Effekte vor allem im hohen Elevationsbereich lassen nicht



unerhebliche Auswirkungen auf die Positionierung in Abhängigkeit von der geographischen Lage (Nordloch) vermuten. Dies wird im nächsten Kapitel dokumentiert.

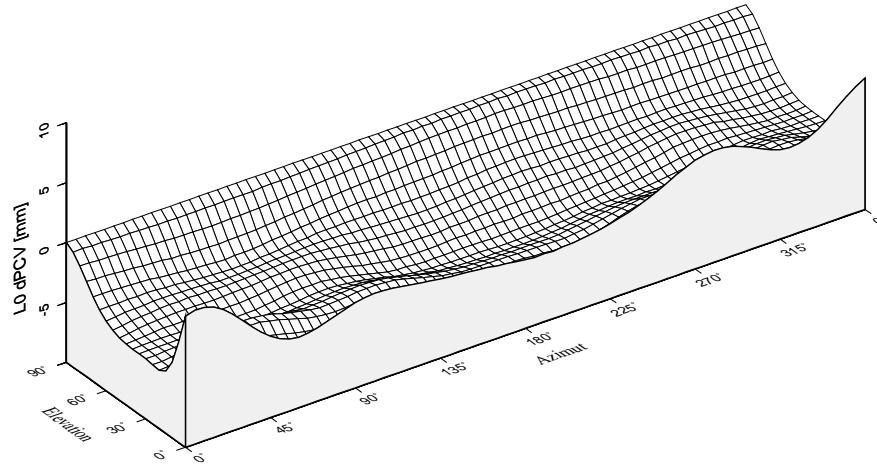


Abbildung 7.17: Differenz der Phasenzentrumsvariationen einer TRM29659.00 mit/ohne SCIS-Dome ( $L_0$ ).

Es zeigt sich, dass vor allem die Montierung, aber auch das Material eine entscheidende Rolle für die Auswirkungen von Domes auf die PCV spielen. Bei den meisten Dome-Typen finden sich kleine Effekte im Bereich von  $\pm 1$ -2 mm. Dieses zeigen auch unabhängige Untersuchungen durch Kammerkalibrierungen (*Schupler und Clark 2000*). Bestimmte Konstruktionsformen hingegen weisen starke Veränderungen mit großen Gradienten auf, die für die hochpräzise Positionsbestimmung, zum Beispiel innerhalb von Permanentnetzen für Geodynamik o.ä., eine entscheidende Rolle spielen.

## 7.4 Bemerkungen zu speziellen Antennentypen, Typ- und Individualkalibrierung

In den Vorabschnitten wurde deutlich, dass bestimmte Veränderungen bzw. Eigenschaften nahe des Empfangselementes einen großen Einfluss auf die Phasenzentrumsvariationen haben. Dies zeigt sich auch durch ein ähnliches PCV-Muster von Antennen mit fast identischen Formen und gleichem oder ähnlichem Empfangselement. Dazu gehören zum Beispiel die Trimble Antennen, deren PCV durch die identische Form und Größe der bekannten Grundplatte dominiert werden. Beispiele sind die sog. Trimble Permanent (TRM23903.00), Compact (TRM22020.00), Micro-centered (TRM33429.00, TRM33429.20) und Geodetic (TRM14532.00) Antennen. Gleiches trifft für Choke Ring Antennen zum Beispiel von AOA, Trimble, Ashtech und Leica zu. Diese besitzen einen fast identischen Choke Ring aus Metall und ein Dorne-Margolin Kreuzdipol Empfangselement. Unterschiede sind lediglich in den teilweise firmenspezifischen Vorverstärkern vorhanden. Die PCV differieren nur marginal. Die Beispiele lassen sich beliebig für diverse Modelle bzw. Modellgruppen fortführen (Ashtech Geodetic Antennen etc.) und belegen die Dominanz von Grundplatte bzw. Gehäuseelementen im Nahfeld auf die PCV.

Im Abschnitt über Rover-Antennen wurde ersichtlich, dass bei entsprechender Abschirmung und Gehäuseform ein homogenes Empfangsverhalten mit nur geringfügig von einer Kugelform abwei-

chenden Phasenvariationen möglich ist. Ansonsten wird das PCV-Muster bei kompakten Geräten vor allem durch die Gehäuseform bestimmt. Ein weiteres Beispiel hierfür ist die Hiper-Antenne von TOPCON (HIPER\_GD), die unterhalb der Antenne den Empfänger im quadratischen Gehäuse mit ca. 15 cm Kantenlänge integriert hat. Am IfE wurde eine Testantenne ohne integrierten Empfänger kalibriert, die sonst aber exakt die gleiche Gehäuseform aufweist. Die Ergebnisse für  $L_1$  in Abbildung 7.18 zeigen wiederholt die Dominanz des eckigen Gehäuses auf die PCV mit den entsprechenden Minima und Maxima. Gleichzeitig ist eine Inhomogenität der PCV im Bereich um  $135^\circ$  zu erkennen. Hier unterscheidet sich das lokale Minimum um 2-3 mm von den anderen Minima. Weiterhin ist ein veränderter Gradient in Azimut- wie auch in Elevationsrichtung zu erkennen. Bedingt ist dies durch den - zwar geringen - Einfluss eines hier verwendeten größeren Anschlussadapters am Gehäuse nahe dem Empfangselement, der nicht durch eine Grundplatte abgeschirmt wird.

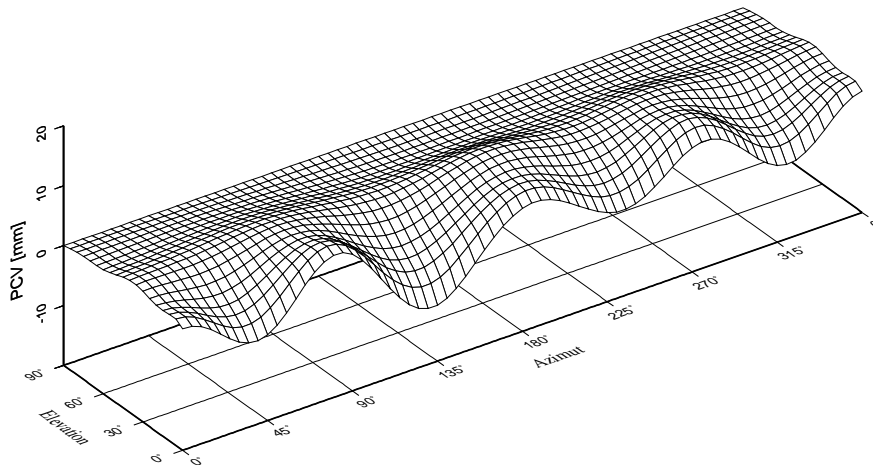
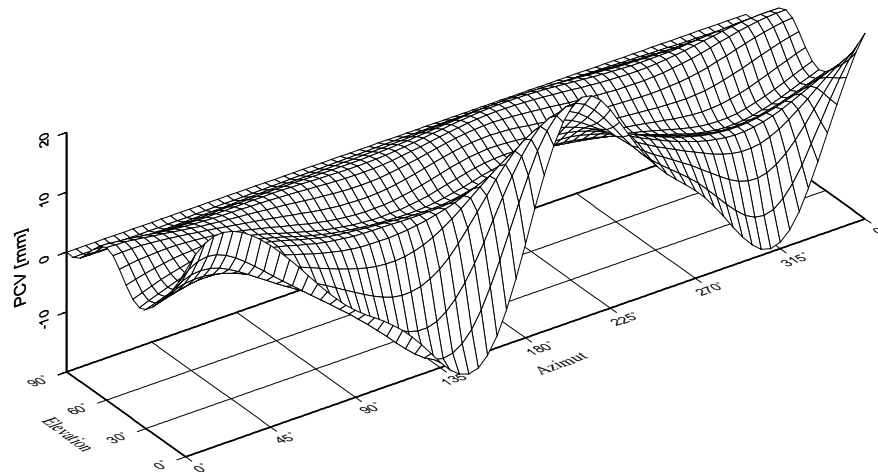


Abbildung 7.18: Phasenzentrumsvariationen einer HIPER\_GD ( $L_1$ ).

Dies wurde unabhängig und mit wesentlich größeren Auswirkungen für bestimmte integrierte Modelle und Antennen mit zusätzlicher exzentrischer Kommunikationsantenne (hier: passiv) nachgewiesen (*Schmitz 2001*). Dabei konnten im PCV-Muster deutlich die Auswirkungen von zum Beispiel Bedienelementen oder den Montierungen exzentrischer Antennen erkannt werden. Teilweise sind auch bereits Veränderungen in den Offsets sichtbar. Durch aktive Kommunikationsantennen sollten keine zusätzlichen Störungen auftreten, da hier die Filter im LNA entsprechend abgestimmt werden (*Tatarnikov 2001*). Dazu konnten allerdings im Rahmen dieser Arbeit noch keine weiteren Untersuchungen durchgeführt werden.

Effekte von Montierungen und weiteren Antennenelementen lassen sich an anderen Typen wie Helix-Antennen nachweisen, die aktuell kaum noch für hochpräzise Anwendungen genutzt werden. Beispielsweise gehören hierzu die breitbandige Spiral-Helix des TI4100-Empfängers, aber auch die ursprünglich eher im Navigationsbereich eingesetzte (Low-Cost) Einfrequenzantenne von NAVSTAR, die beide keine Grundplatte besitzen. Die PCV der NAVSTAR-Antenne (Abbildung 7.19) zeigt dadurch große Veränderungen im unteren Elevationsbereich. Zudem sind starke Minima und Maxima zu erkennen, die u.a. auf die Montierung zurückzuführen sind. Dabei befindet sich im Süden das nicht durch eine Grundplatte o.ä. abgeschirmte Antennenkabel, welches als PCV-Effekt deutlich zu erkennen ist.

Neben den teilweise starken Effekten auf die PCV durch spezielle Antennenelemente müssen

Abbildung 7.19: Phasenzentrumsvariationen einer  $L_1$ -NAVSTAR-Antenne.

auf der anderen Seite auch mögliche Differenzen innerhalb einer Baureihe untersucht werden. Unterschiede zwischen Typkalibrierungen und Individualkalibrierungen können - beruhend auf den gesammelten Erfahrungen der bisher durchgeführten Kalibrierungen - normalerweise als sehr gering eingeschätzt werden und beruhen vor allem auf den Fertigungsmethoden und -toleranzen der Hersteller. Dabei sind sicherlich Unterschiede zwischen Low-Cost Antennen und teuren Referenzstationsantennen zu erwarten. Dies beruht einerseits auf der herabgesetzten Wiederholungsgenauigkeit zum Beispiel individueller Rover-Antennen (Abbildung 7.1) gegenüber derjenigen individueller Choke-Ring Antennen (Abbildung 6.9). Vergleicht man Ergebnisse von Typ- und Individualkalibrierungen, stellt man fest, dass durchweg Unterschiede auch bei hochwertigen Antennen vorhanden sind, die zumindest mit dem Absoluten Feldverfahren signifikant nachgewiesen werden können (Tabelle 7.1).

Beispielhaft werden hier Ergebnisse vorgestellt, bei denen ein Typmittel aus Ergebnissen von IfE und Geo++<sup>®</sup> jeweils mit einer Individualkalibrierung für den Antennentyp verglichen wurde. Für eine Choke-Ring Antenne (TRM29659.00) wurden 61 Einzelkalibrierungen von sechs verschiedenen individuellen Antennen gleichen Typs gemeinsam ausgeglichen und die minimalen und maximalen Abweichungen pro 5°-Elevationsklasse betrachtet. Vergleicht man Abbildung 7.20 mit den gleichen Untersuchungen für eine individuelle Antenne in Abbildung 6.9, so wird bereits ersichtlich, dass auch für diesen Choke-Ring Typ ein wesentlich höheres Rauschniveau auftritt. Die maximalen Abweichungen am Horizont beispielsweise für  $L_1$  sind von vorher ca.  $\pm 2$  mm nahezu verdoppelt, was oberhalb der Kalibrierungsgenauigkeit des Verfahrens liegt und klar auf geringe Differenzen zwischen einzelnen Realisierungen dieses Antennentyps hinweist.

Die gleiche Untersuchung wurde für eine kompakte Marine-Antenne von Ashtech (ASH700700.B) durchgeführt, bei der 36 Einzelkalibrierungen von fünf Antennen dieses Typs betrachtet werden. Ebenso wie im vorherigen Beispiel zeigt Abbildung 7.21 im Vergleich mit der Wiederholungsgenauigkeit für eine individuelle Rover-Antenne in Abbildung 7.1 ein abfallendes Niveau. Die Marine-Antenne weist sonst eher eine Wiederholungsgenauigkeit ähnlich derjenigen geodätischer Antennen auf. Der Unterschied eines Typmittels gegenüber individuellen PCV manifestiert sich hier besonders für  $L_1$ , wo teilweise bis zu  $\pm 6$  mm und mehr maximale Abweichungen der Einzelkalibrierungen zum Typmittel wo am Horizont auftreten.

Neben den Betrachtungen des Niveaus maximaler Einzelabweichungen verschiedener Individual-

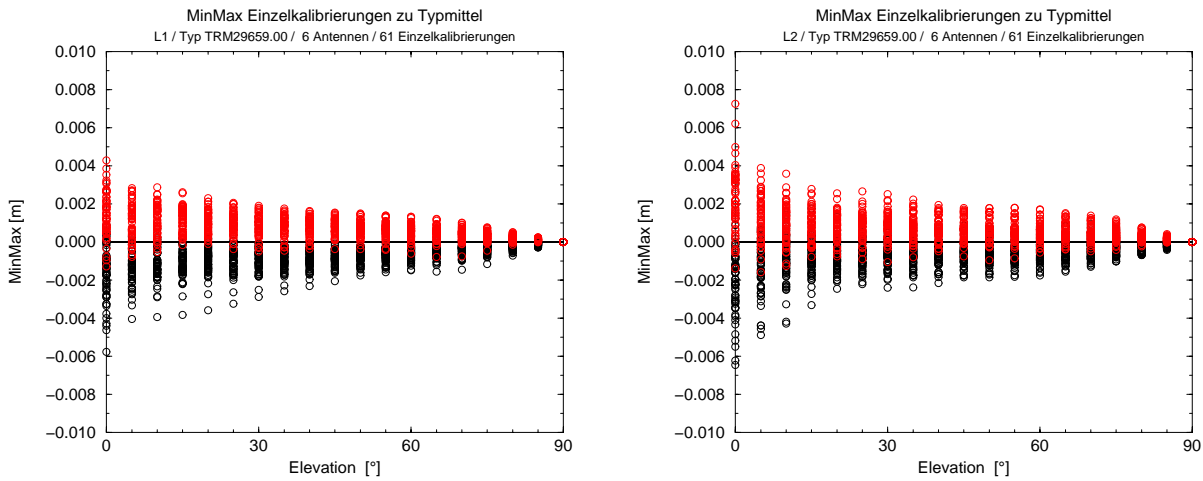


Abbildung 7.20: Minimale und maximale Abweichungen einzelner PCV-Werte aus Einzelkalibrierungen bezüglich des Typmittels (TRM29659.00). Beispiel für Choke Ring Antenne (6 Antennen, 61 Einzelkalibrierungen).

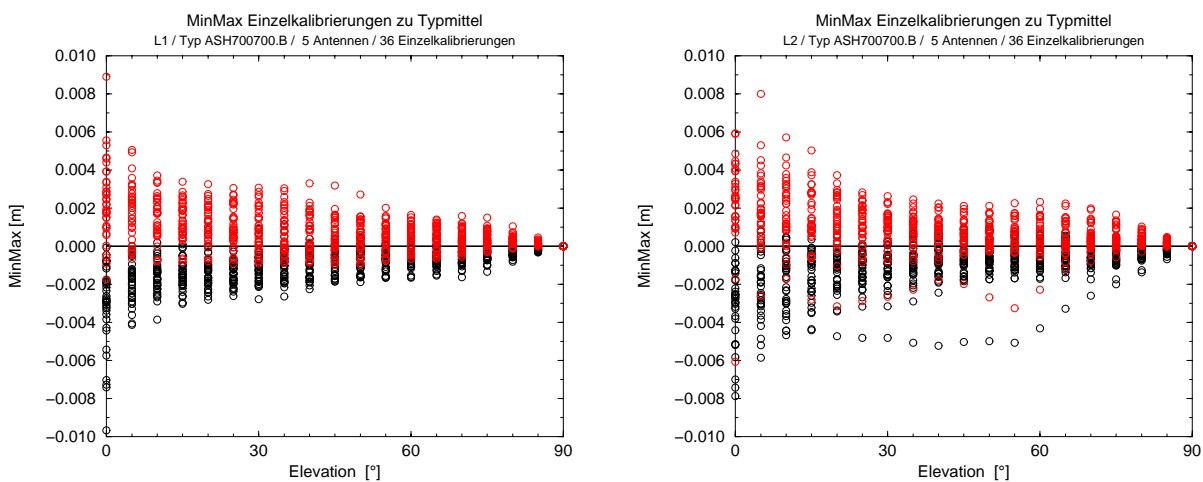


Abbildung 7.21: Minimale und maximale Abweichungen einzelner PCV-Werte aus Einzelkalibrierungen bezüglich des Typmittels (ASH700700.B). Beispiel für Rover-Antenne (5 Antennen, 36 Einzelkalibrierungen).

kalibrierungen zum Typmittel können PCV-Ergebnisse für einzelne Antennen auch absolut mit Typmitteln verglichen werden. Tabelle 7.1 zeigt die aus den Differenzen gebildeten Standardabweichungen für drei Antennentypen. Dabei werden für zwei individuelle Antennen TRM29659.00 deren Unterschiede zum Typmittel und auch untereinander deutlich. In allen Beispielen liegen die Standardabweichungen für  $L_1$  unter 1 mm, wobei einzelne Abweichungen - wie vorher gezeigt und in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt - wesentlich größer sein können. Für  $L_0$  liegen die Standardabweichungen zwischen 1 und 4 mm. Dies zeigt, dass in hochgenauen ausgedehnten Referenznetzen, besonders bei Kurzzeitanwendungen, durchaus zu berücksichtigende Effekte durch Unterschiede zwischen Typ- und Individualkalibrierung in der Koordinatenlösung auftreten können (vgl. Abschnitt 4.5). Die Abbildungen 7.22 bis 7.24 zeigen die absoluten Differenzen für das

Tabelle 7.1: Standardabweichungen aus Differenzen zwischen Individual-PCV und einem Typmittel. Beispiele für 3 Antennentypen (Typmittel TRM29659.00 aus 6 Antennen und 61 Einzelkalibrierungen, Typmittel ASH700228.A aus 7 Antennen und 30 Einzelkalibrierungen, Typmittel LEIAT502 aus 8 Antennen und 60 Einzelkalibrierungen).

Antennentyp (Sigma aus dPCV zw. Typ- u. Individualkalib., gebildet vom Zenit bis 0° Elv.)	Sigma [mm]	Sigma [mm]
	$L_1$	$L_0$
TRM29659.00 (1)	0.5	1.3
TRM29659.00 (2)	0.5	2.9
ASH700228.A	0.7	1.5
LEIAT502	0.7	3.6

ionosphärenfreie Signal  $L_0$  für eine Referenzstations-, eine geodätische und eine Rover-Antenne. Für  $L_0$  können einzelne Extremwerte von bis zu  $\pm 1$  cm bei der LEIAT502 vorkommen. Dies verbessert sich zu vereinzelt Differenzen von maximal  $\pm 2$ -3 mm bei einer der TRM29659.00 (vgl. Antenne 1 in Tabelle 7.1).

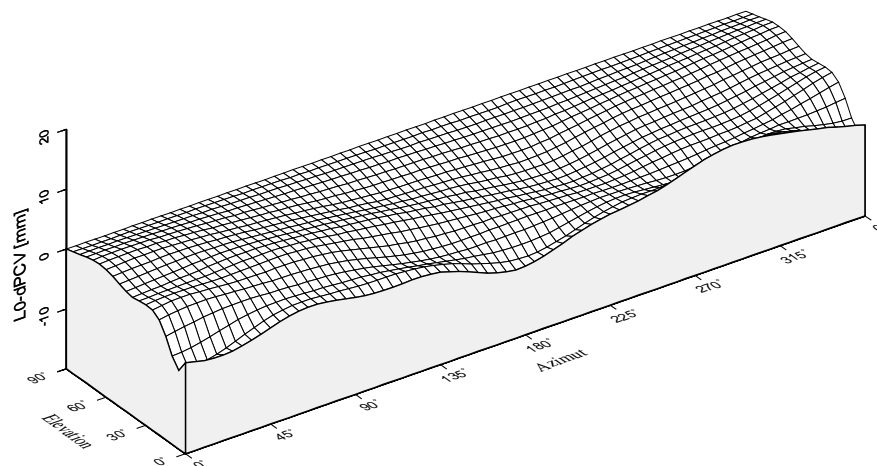


Abbildung 7.22: Differenz der Phasenzentrumsvariationen einer individuellen TRM29659.00 (Antenne 2 in Tabelle 7.1) gegenüber einem Typmittel ( $L_0$ ). Größere Unterschiede.

Die Untersuchungen in diesem Beispiel zeigen, dass neben den die PCV einer Antenne beeinflussenden individuellen Konstruktionsmerkmalen auch die Unterschiede zwischen den Realisierungen innerhalb einer Baureihe/Typreihe zu beachten sind. Speziell für hochpräzise Anwendungen können diese vergleichsweise kleinen Differenzen nicht grundsätzlich vernachlässigt werden. Es muss weiterhin angemerkt werden, dass im Rahmen der bisher durchgeführten Kalibrierungen auch wesentlich stärkere Abweichungen aufgetreten sind. Teilweise kann dies in herstellerseitig vorgenommenen Veränderungen begründet sein, die dem Nutzer aber nicht in jedem Fall bekannt sein müssen. Es wurden aber auch grobe Fehler innerhalb eines Antennentyps auffällig (*Wübbena u.a. 2000b*), die u.U. durch eine falsche manuelle Montage (zum Beispiel falsche Ausrichtung Empfangselement) verursacht wurden. Neben einer anzustrebenden individuellen Kalibrierung für höchste Ansprüche sollten für den Fall, dass lediglich Typmittel eingesetzt werden,

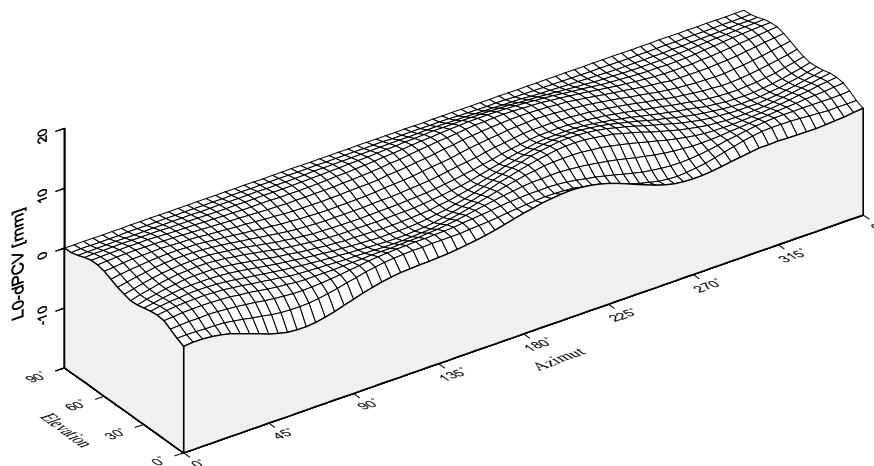


Abbildung 7.23: Differenz der Phasenzentrumsvariationen einer individuellen ASH700228.A gegenüber einem Typmittel ( $L_0$ ). Beispiel für geodätische Antenne.

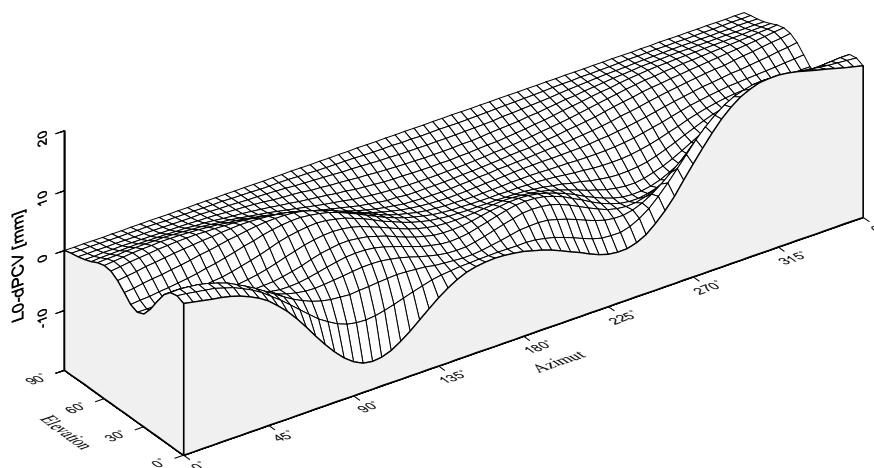


Abbildung 7.24: Differenz der Phasenzentrumsvariationen einer individuellen LEIAT502 gegenüber einem Typmittel ( $L_0$ ). Beispiel für Rover-Antenne.

zumindest in regelmäßigen Abständen Prüfungen der genutzten Antennen auf Veränderungen bzw. Übereinstimmung und bei neuen Antennen gleichen Typs auf Vergleichbarkeit vorgenommen werden.

## Kapitel 8

# Einfluss der PCV auf die präzise GPS-Auswertung

Nach der eingehenden Behandlung der Grundlagen zu Antennen, der Kalibrierungsverfahren mit dem Schwerpunkt der Absoluten Feldkalibrierung, von Vergleichen und von Kalibrierungsergebnissen bestimmter Antennen wird in diesem Kapitel der Einfluss der jeweiligen PCV-Korrektur speziell hinsichtlich hochpräziser Anwendungen dargestellt. Dabei können ob der Vielzahl der möglichen Beobachtungsszenarien nicht alle denkbaren Anwendungen durch Einzelversuche nachgestellt werden. Durch eine Auswahl bestimmter und zum Teil spezieller Messungskonfigurationen im Zusammenhang mit den theoretischen Ergebnissen aus Abschnitt 4.5 werden die Auswirkungen und die Notwendigkeit einer hochauflösenden PCV-Korrektur deutlich gemacht.

### 8.1 Übersicht über Auswirkungen von PCV in verschiedenen Anwendungen

Der Einfluss der Nichtberücksichtigung des tatsächlichen Empfangsverhalten der GPS-Antennen ist sehr vielfältig und hängt von der jeweiligen Messanordnung und Auswertung ab. Die Verfälschung der Koordinatenergebnisse kann im Bereich von Millimetern bis zu Zentimetern liegen, wobei die Höhenkomponente in der Regel am stärksten betroffen ist. Über Fehlerfortpflanzung wurde bereits in Abschnitt 4.5 gezeigt, dass sich mm-Antennenfehler als cm-Koordinatenfehler auswirken können. Die im Vorkapitel gezeigten Beispiele für PCV verschiedener Antennentypen unterstreichen, dass ihre gänzliche Vernachlässigung für hochpräzise Anwendungen nicht akzeptabel ist.

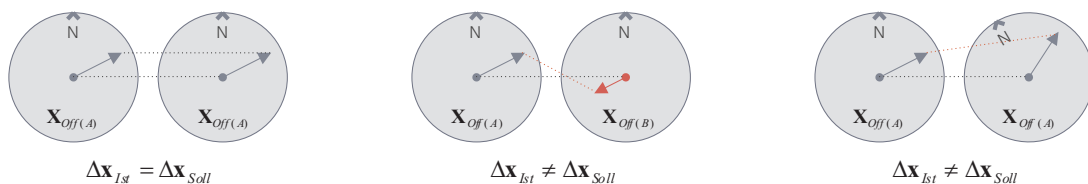


Abbildung 8.1: Auswirkung von Antennenfehlern auf die Basislinie am Beispiel der Offsets. Verschiedene Szenarien bezüglich Antennentyp und Antennenorientierung.

Die Einflüsse der Phasenzentrumsvariationen auf die Positionsbestimmung lassen sich prinzipiell in einem ersten Schritt anschaulich anhand der Offsets darstellen (*Schupler und Clark 1991*). Abbildung 8.1 zeigt mögliche Auswirkungen (hier: Lagekomponenten) in unterschiedlichen Messungsanordnungen. Das linke Bild zeigt sehr vereinfacht das Szenario für die Verwendung identischer Antennen auf kurzer Basis und gleicher Ausrichtung. Eine Nichtberücksichtigung der Offsets spielt in diesem Fall keine Rolle, da sich ihre Fehlerwirkung aufhebt. Das mittlere Bild zeigt die gleiche Ausrichtung von zwei gänzlich verschiedenen Antennen. Die Vernachlässigung der unterschiedlichen Offsets verfälscht die Basislinie. Das rechte Bild schließlich zeigt identische Antennen mit unterschiedlicher Ausrichtung auf kurzer Basis. Auch hier wird offensichtlich, dass sich Koordinatenfehler ergeben. Die Situation beschreibt ebenso die Situation bei gleichermaßen nach Norden orientierten Antennen in einem großen Netz. Durch große geographische Ortsunterschiede ergeben sich dabei gegeneinander verdrehte Antennen (vgl. unten). Äquivalente Situationen können für die Höhenkomponente angegeben werden.

Die Gesamtsituation ist allerdings viel umfangreicher und wird anhand der Offsets auf Grund vieler Vernachlässigungen (vgl. auch Abschnitt 5.1) nur unzureichend erklärt. Der Koordinateneinfluss ist vielmehr abhängig von verschiedensten Faktoren wie

- Antennen(typen),
- Art und Qualität der Korrektur,
- Netzkonfiguration,
- Art der Anwendung und
- Auswertung.

Grundsätzlich gelten die theoretischen Überlegungen aus Abschnitt 4.5. In praktischen Anwendungen wirken oftmals verschiedene Einflussfaktoren zusammen, wobei möglicherweise nicht in jedem Fall alle davon bekannt sind. Die obige Aufzählung zeigt das Ineinanderspielen dieser Faktoren. So ist prinzipiell für eine entsprechende Korrektur natürlich die exakte Kenntnis der eingesetzten Antennen notwendig. Die Art und Qualität der schließlich verwendeten PCV-Korrektur ist der entscheidende Faktor. Zum Beispiel ist die Nichtberücksichtigung, eine reine Offset-, eine rein elevationsabhängige oder eine komplette PCV-Korrektur möglich. Wie bereits dargelegt, ergeben sich daraus zusätzlich Unterschiede zwischen Ergebnissen verschiedener Kalibrierungsarten und Korrekturmodellen. Dabei können sich wiederum Abhängigkeiten von den jeweils eingesetzten Antennen ergeben, zum Beispiel bei Typen mit starken azimutalen Variationen und auch Unterschiede beim Einsatz von Typmitteln. Letztlich ist die Netzkonfiguration und die Art der Anwendung im Zusammenhang mit der Auswertung entscheidend. Die Anzahl und Entfernung der Stationen, Beobachtungszeiten bzw. Echtzeitanwendungen bedingen spezielle Auswertungsmodi (Elevationsmaske, Troposphärenmodellierung, Zweifrequenzauswertung etc.), die immer im Zusammenhang mit den jeweils eingesetzten Antennen und PCV-Korrekturen Auswirkungen auf die Koordinatenbestimmung ergeben.

Es wird deutlich, dass die Auswirkungen nicht komplett an den Offsets (s.o.) erklärt werden können. Die wesentlich komplexeren Auswirkungen lassen sich anhand elevationsabhängiger PCV in den Abbildungen 8.2 bis 8.4 darstellen. Hier wird ersichtlich, dass auch die Zeitkomponente (Beobachtungsdauer), die Satellitenkonstellation und andere Faktoren in die Positionslösung hineinwirken. Es wird zudem deutlich, dass bei der reinen Offset-Verwendung die nicht erfassten Restfehler des PCV-Modelles eine große Rolle spielen.



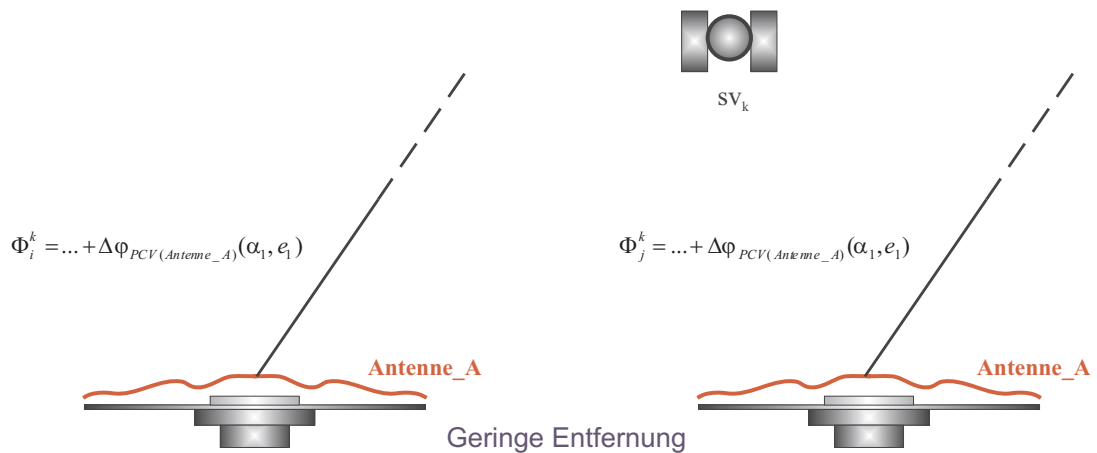


Abbildung 8.2: PCV-Situation bei Nutzung identischer Antennen und kurzer Basis.

Abbildung 8.2 zeigt die Situation für kurze Basislinien und bei Nutzung identischer Antennen. In dieser qualitativen Betrachtung sollen vorerst mögliche Unterschiede zwischen Antennen gleichen Typs vernachlässigt werden. Die identischen Fehler auf beiden Stationen heben sich auf. Dies gilt für Kurzzeit- wie auch für Langzeitbeobachtungen. Allerdings muss angemerkt werden, dass vor allem bei starken Variationen der Phasenzentren eine Korrektur in Kurzzeitanwendungen auch für identische Antennen sinnvoll ist, da eine schnelle und zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung unterstützt wird. Dies gilt speziell für größere Netze, wo eine Trennung aller wirksamen Fehleranteile wichtig ist.

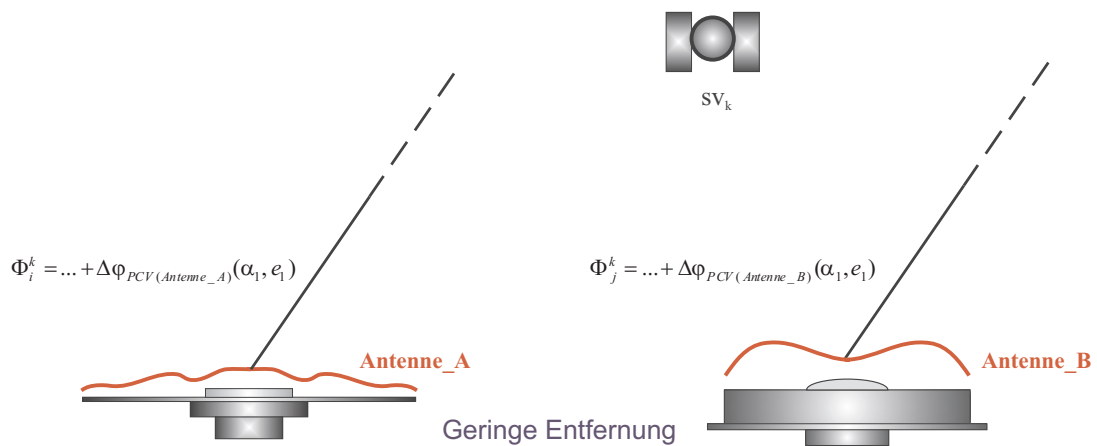


Abbildung 8.3: PCV-Situation bei Nutzung unterschiedlicher Antennen und kurzer Basis.

Die Beobachtungskonstellation in Abbildung 8.3 zeigt anhand einer kurzen Basis mit gleich ausgerichteten Antennen den Einfluss, der sich durch die Verwendung unterschiedlicher Antennentypen ergeben kann. Dies entspricht ebenso der Situation von Differenzen innerhalb gleicher Antennentypen. Die Situation gilt gleichermaßen für größere Netze, wobei dann bei Vernachlässigung der PCV und gleichzeitiger Troposphärenmodellierung sehr große Positionsfehler vor allem in der Höhenkomponente entstehen können (Abschnitt 3.3). Dies wurde erstmalig durch die Verwendung unterschiedlicher Antennentypen im IGS bewusst, da zu Beginn der globalen Netzinstallation und Auswertung nur identische AOAD/M\_T eingesetzt wurden. Nach Aus-

tausch einiger Antennen und Beibehaltung gleicher Auswertestrategien (reine Offset-Korrektur) traten Höhendifferenzen von bis zu 10 cm auf (Rothacher u.a. 1995), die nach Anbringen relativer PCV-Korrekturen wieder verschwanden. Auf diese Weise konnte auch experimentell die starke Korrelation zwischen PCV und Troposphärenmodellierung gezeigt werden (Abschnitt 8.3).

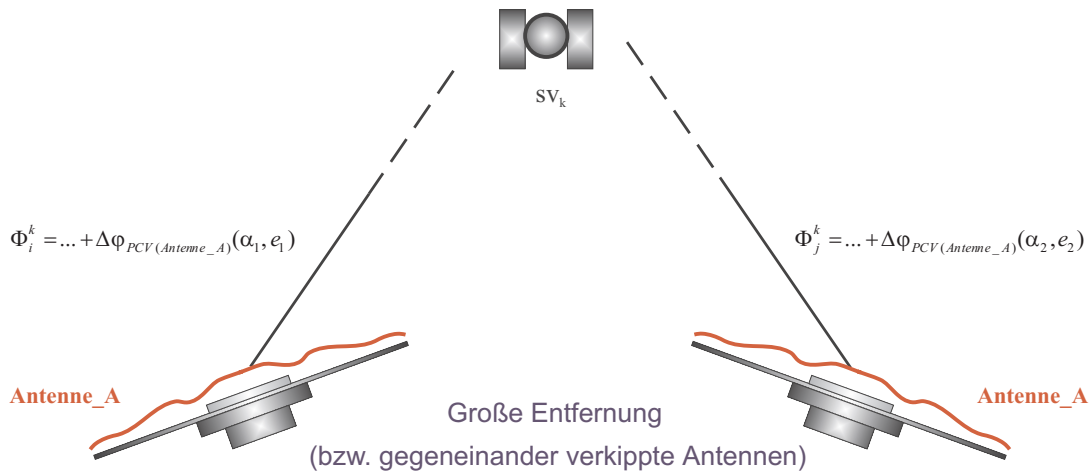


Abbildung 8.4: PCV-Situation bei Nutzung identischer Antennen und langer Basis bzw. gegeneinander verkippte Antennen.

Abbildung 8.4 schließlich erklärt die Konstellation in großen Netzen anhand identischer Antennen. Durch große geographische Unterschiede der Stationen ergeben sich Unterschiede in der Orientierung der Antennen. Große Entfernungen bewirken Unterschiede in der Einfallsrichtung gleichzeitig auf den Stationen empfangener Satelliten, wodurch unterschiedliche PCV-Korrekturen trotz identischer Antennen notwendig werden. Relative PCV sind auf Grund der Voraussetzung einer Gleichausrichtung in diesem Fall nicht mehr geeignet. Zur Zeit als nur wenige PCV-Ergebnisse aus absoluten Kammerkalibrierungen bekannt waren und sich Unterschiede zu den Relativlösungen ergaben (Rothacher u.a. 1995), wurden die auftretenden Differenzen als Maßstabsfehler bezeichnet. Fehler im Modell der absoluten PCV der Empfangsantennen wurden als Grund angesehen. Dies ist mittlerweile widerlegt und wird in Abschnitt 8.3 ausführlich beschrieben. Eine ähnliche Situation ergibt sich in lokalen zum Beispiel kinematischen Anwendungen, wenn die Antennen in ihrer Bewegung gegeneinander verkippt und verdreht sind. Auch hier sind absolute PCV orientiert zu korrigieren.

### 8.1.1 Exkurs: Antennenorientierung und Phasenmessung

Für den Fall sich gegeneinander verkippernder und verdrehender Antennen - das gilt auch für den Vorgang der absoluten Antennenkalibrierung selbst - muss ein weiterer Effekt berücksichtigt werden. Auf Grund von Änderungen der Orientierungen zwischen Empfangs- und Satellitenantennen tritt eine Veränderung der Phasenmessung auf, der sog. *phase wind-up*, die in präzisen Anwendungen korrigiert werden muss. Der Korrektur-Effekt wirkt sich in kleinen Netzen nicht signifikant aus und ist auch in großen Netzen im Vergleich mit anderen Fehlerkomponenten u.U. relativ klein. Im lokalen Bereich ist er bei starken Orientierungsänderungen der Empfangsantenne ein wichtiger Einflussfaktor. Der Effekt basiert auf den bei GPS genutzten zirkular polarisierten Wellen. Es ist eine Konstellation denkbar, in der der gemessene Phasenwinkel an der Empfangsantenne dem geometrischen Winkel zwischen elektrischem Feld an der Antenne

und einer Referenzrichtung entspricht. Eine Orientierungsänderung bewirkt auch eine Veränderung der Referenzrichtung und dementsprechend eine Veränderung der Phasenmessung. Die gleiche Vorstellung kann für eine Sendeantenne angenommen werden. Somit hängt die beobachtete Trägerphasenmessung von der Orientierung zwischen jeweiliger Sende- und Empfangsantenne ab.

Die Rotation um die vertikale Drehachse einer Antenne, also eine reine azimutale Verdrehung, bewirkt eine Veränderung der Phasenmessung bis zu einem vollen Zyklus entsprechend einer vollen Umdrehung. Für die Beobachtungskonstellation bei GPS-Messungen sind nun verschiedene Szenarien möglich, wobei in Abhängigkeit von der jeweiligen Geometrie zwischen Satelliten- und Empfangsantenne unterschiedliche Effekte auftreten. Bei statischen Messungen kann die Empfangsantenne normalerweise als fest bezüglich ihrer lokalen Ausrichtung angenommen werden. Sie unterliegt keiner Rotation. Bezüglich der Satellitenantennen treten verschiedene Effekte auf. Einerseits ändert sich ständig die Geometrie zwischen Station und Satellit. Andererseits erfährt der Satellit spezielle Eigenrotationen. Dazu gehören langsame Rotationen durch die ständige Sonnenausrichtung, aber auch schnelle Drehungen auf Grund notwendiger Neuausrichtungen der Sonnensegel beim Durchgang durch die Ekliptik in zwei Positionen, in denen der Satellit mit der Sonne und der Erde eine gerade Linie bildet, die sog. *noon* bzw. *midnight turns* (Kouba und Héroux 2001). Es wird bereits qualitativ deutlich, dass sich in kleineren Netzen durch die kaum vorhandenen Geometrieunterschiede auf beiden Stationen einer Basislinie beim Einsatz von Doppelten Differenzen (DD) als Beobachtungsgröße kaum Auswirkungen ergeben. Bei größeren Netzausdehnungen ist dies nicht mehr der Fall, da die Geometrieänderungen bezüglich einer Referenzrichtung zwischen geographisch weit entfernt liegenden Stationen hinsichtlich identischer Satelliten sehr unterschiedlich sein können. Empirische Untersuchungen zeigen für die DD-Phasenresiduen einer Basislinie von über 4000 km einen Effekt bis zu 4 cm für  $L_1$  (Wu u.a. 1993). Diese Größenordnung kann sich durchaus negativ auf die Bestimmung anderer Parameter auswirken.

Für auf undifferenzierten Beobachtungen basierende Softwarepakete ist der Effekt von besonderer Bedeutung, da Auswirkungen bis zu einer halben Wellenlänge erwartet werden können. Bei einer präzisen Einzelstationslösung (*Precise Point Positioning PPP*) mit festgehaltenen Bahnen und Uhren der Satelliten können sich beispielsweise Positions- und Uhrfehler auf Dezimeter-Niveau ergeben. Für den Fall der reinen azimutalen Verdrehung einer Antenne würde der Effekt vollständig im Uhrfehler aufgenommen werden. Dieser ideale Fall tritt nie ein, da sich bei statischen Beobachtungen einerseits die o.g. Satellitenrotationen ergeben. Bei kinematischen Beobachtungen in lokalen Netzen mit identischer Satellitengeometrie für alle beteiligten Stationen hingegen kann sich die Empfangsantenne unterschiedlich verdrehen und verkippen. Nach Wu u.a. (1993) ergibt sich die Korrektur des *phase wind-up* als Bruchteil einer Wellenlänge in Zyklen zu

$$\Delta\varphi_{wind-up} = \frac{sgn(\zeta)}{2\pi} \cdot \arccos\left(\frac{\mathbf{D}^k \cdot \mathbf{D}_i}{|\mathbf{D}^k| \cdot |\mathbf{D}_i|}\right). \quad (8.1)$$

Dabei ist

$$\zeta = \mathbf{k} \cdot (\mathbf{D}^k \times \mathbf{D}_i) \quad (8.2)$$

mit dem Einheitsrichtungsvektor  $\mathbf{k}$  zwischen Sende- und Empfangsantenne (vgl. auch Wellenvektor Kapitel 4).  $\mathbf{D}^k$  ist der effektive Dipolvektor der Sendeantenne des Satelliten  $k$  und  $\mathbf{D}_i$  der effektive Dipolvektor der Empfangsantenne der Station  $i$ . Alle Vektoren werden einheitlich im globalen, erdfesten, kartesischen Bezugssystem beschrieben. Der effektive Dipolvektor als Resultierende des angenommenen Kreuzdipols der Empfangsantenne kann als

$$\mathbf{D}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_i) + (\mathbf{k} \times \mathbf{y}_i) \quad (8.3)$$

und der Satellitenantenne als

$$\mathbf{D}^k = \mathbf{x}^k - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}^k) - (\mathbf{k} \times \mathbf{y}^k) \quad (8.4)$$

abgeleitet werden.  $\mathbf{x}_i$  und  $\mathbf{y}_i$  bzw.  $\mathbf{x}^k$  und  $\mathbf{y}^k$  sind die Einheitsvektoren in den Richtungen der zwei Dipolelemente in der Empfangs- bzw. Satellitenantenne, wobei die zuerst im jeweiligen lokalen Antennensystem definierten Vektoren in das globale überführt werden müssen. Voraussetzung ist somit die exakte Kenntnis der Orientierungen und Orientierungsänderungen der beteiligten Antennen im jeweiligen System. Zu beachten sind die Definitionen der lokalen Systeme, mit einem linkshändigen Empfängersystem (Abschnitt 4.4.2) und dem fixierten System des Satelliten (*Beutler u. a. 1998*).

Der Effekt wurde von anderen Gruppen bezüglich stark rotierender Antennen im militärischen Bereich untersucht (*Tetewsky und Mullen 1997*). Auch hier wurde anhand der sich drehenden Empfangsantenne gezeigt, dass die Phasenbeobachtung funktionell von der Orientierung bezüglich der Signalquelle abhängt. Die Antennen wurden auch in diesen Experimenten als Kreuzdipole modelliert. Aus diesen Untersuchungen und den Ableitungen von *Wu u. a. (1993)* ergibt sich die Frage, ob das angenommene einfache Antennenmodell tatsächlich bzw. in welchem Genauigkeitsbereich für die diversen anderen üblichen Antennen(typen) gültig ist. Real repräsentiert der angenommene idealisierte Kreuzdipol nur teilweise die Empfangs- und Sendecharakteristik verschiedener anderer Antennen(typen) und stellt somit nur eine vereinfachte Annahme dar. Dieses kann u.U. hochpräzise GPS-Phasenmessungen beeinflussen.

## 8.2 Lokale Anwendungen

In lokalen Netzen mit kurzen Basislinien kommt eine vernachlässigte PCV-Korrektur fast direkt in der Positionslösung zum Tragen, da andere GPS-Fehlerkomponenten wie entfernungsabhängige Einflüsse sich differentiell kaum auswirken. Speziell für Kurzzeit- und RTK-Anwendungen ist das Einführen von PCV für hochpräzise Ergebnisse von besonderer Wichtigkeit. Zur Bewertung des Einflusses verschiedener Kalibrierungsergebnisse auf die Positionslösung werden beispielhaft die Auswertungen eines kleinen Pfeilernetzes auf dem Messdach der Universität vorgestellt. Im vorliegenden Netz wurden 24h-Beobachtungen auf sechs Pfeilern mit jeweils verschiedenen Antennentypen durchgeführt (Tabelle 8.1), die sehr unterschiedliches Empfangsverhalten aufweisen. Die Basislinienlängen liegen zwischen 5 und 8 m. Zwischen den Pfeilern sind die exakten Höhendifferenzen durch ein Präzisionsnivellement bekannt. Im Auswerteprozess mit GEONAP

(Wübbena 1989) wurden die Mehrdeutigkeiten vollständig gelöst und verschiedene Lösungen mit unterschiedlichen Signalen, Korrekturmodellen, Elevationsmasken, und Beobachtungszeiten berechnet. Auch hinsichtlich der Troposphärenmodellierung wurden verschiedene Berechnungen durchgeführt (Abschnitt 8.3). Die vorgestellten Ergebnisse wurden der Auswertung des Gesamtnetzes entnommen (keine basislinienweise Auswertung), da auf diese Weise die starken Mehrwegeinflüsse des Messdaches auf ein mittleres Niveau gebracht werden.

Mit diesen und weiteren Untersuchungen werden exemplarisch verschiedene Beobachtungskonfigurationen im Zusammenhang mit der PCV-Korrektur für lokale Anwendungen herausgearbeitet. Dazu gehören

- Lang- und Kurzzeitmessungen,
- Nutzung verschiedener Korrekturmodelle,
- Einsatz unterschiedlicher Antennen(typen),
- Auswertung verschiedener Linearkombinationen und
- kinematische Messungen und verkippte Antennen.

### 8.2.1 Kurze gemischte Basislinien

Tabelle 8.1: Gemischtes Netz Messdach. 6 verschiedene Antennentypen. Kurze Basislinien mit hochpräzisen Soll-Höhendifferenzen durch Nivellement.

Pfeiler	Antennentyp
3	ASH700228.A (Ashtech Geodetic I)
4	ASH700700.B (Ashtech Marine B)
5	ASH700228.D (Ashtech Geodetic II)
6	JPSREGANT_DD_E (Javad Dual Depth Choke Ring)
7	ASH700936.E_SNOW (Ashtech Choke Ring, Snow-Dome)
8	AOAD/M_T

Die Lagekomponente wird für die folgenden Ergebnisse nicht gesondert betrachtet, da Lage-Offsets mit allen Verfahren präzise bestimmbar sind und azimutale Variationen für statische Langzeitbeobachtungen im lokalen Bereich keine Rolle spielen. Für die Untersuchungen wurden verschiedene Korrekturen (Typ) des NGS (Mader 1999) und der Absoluten Feldkalibrierung (individuell) des IfE genutzt. Abbildung 8.5 zeigt beispielhaft die Ergebnisse (24h,  $L_1$ ,  $10^\circ$  Elevationsmaske) der Höhendifferenzen zwischen SOLL- und GPS-Lösung. Die absolute Höhe für Pfeiler 8 wurde dabei in der Auswertung fixiert. Der Maßstab der Hochachse wurde bewusst so gewählt, um eine direkte Vergleichbarkeit mit den späteren Untersuchungen hinsichtlich der Schätzung von Troposphärenparametern zu haben (Abbildung 8.9). Die  $L_1$ -Lösungen bei Korrektur relativer rein elevationsabhängiger PCV (NGS) und bei Korrektur absoluter, azimutal und elevationsabhängiger PCV (IfE) zeigen hier kaum Unterschiede für die Langzeitbeobachtungen. Die einzelnen Abweichungen liegen bei 1-3 mm. Auch bei der reinen Offset-Korrektur liegen die Differenzen noch unterhalb von 5 mm, wobei eine aus allen Differenzen gebildete Standardabweichung (Tabelle 8.2) für diesen Fall gegenüber den PCV-Korrekturen etwas abfällt. Die Narrowlane-Lösung ( $L_N$ ) zeigt ähnliche Ergebnisse. Diese und andere Lösungen (zum

Beispiel  $L_0$ ) weisen nach, dass mit allen verfügbaren Korrekturen bei Langzeitbeobachtungen in lokalen Netzen Ergebnisse erzielt werden können, die im Bereich bzw. unterhalb des theoretischen Phasenrauschens des jeweiligen Signals liegen. Mit den PCV-Korrekturen verschiedener Kalibrierungsmethoden können für diesen Fall mit unterschiedlichen Signalen (auch Linearkombinationen) annähernd gleiche Ergebnisse auf Millimeter-Niveau erzielt werden. Durch den Mittelungseffekt langer Beobachtungszeiten können auch mit dem Einsatz reiner Offset-Korrekturen bereits gute Ergebnisse - etwas abfallend gegenüber der PCV-Korrektur - abgeleitet werden. Der Einfluss der Satellitenkonstellation wirkt sich nur wenig aus (geographische Lage/Nordloch). Dabei sind allerdings immer Offsets aus einem identischen Kalibrierungsverfahren zu nutzen, um systematische Fehler vor allem für die problematische Höhenkomponente (vgl. Abschnitt 5.1) auszuschließen.

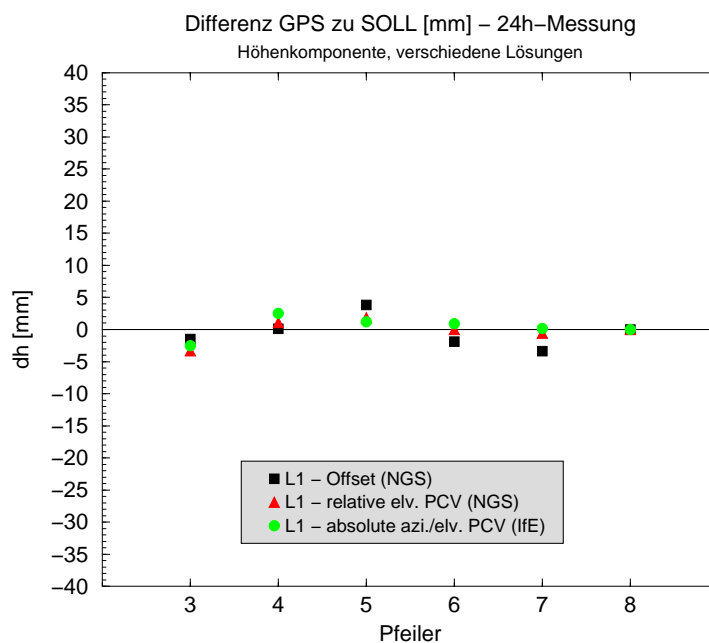


Abbildung 8.5: Gemischtes Netz Messdach. 24h-Auswertung, kurze Basislinien, verschiedene PCV-Modelle. Beispiel für Signal  $L_1$ .

Tabelle 8.2: Beispiel für Genauigkeit der Höhenkomponente (24h,  $L_1$ ) abgeleitet aus Differenzen zur Soll-Position. Gemischtes Netz, kurze Basislinien.

Korrektur Elv. $10^\circ$	$s(\mathbf{h}), L_1$ [mm]	$s(\mathbf{h}), L_N$ [mm]
Nur-Offset ( <i>NGS</i> )	2.3	1.9
Relative PCV (elv) ( <i>NGS</i> )	1.6	1.3
Absolute PCV (azi/elv) ( <i>IfE</i> )	1.6	1.3

In Abschnitt 8.3.1 wird eine Simulation bezüglich des Einflusses von Radomen in globalen Netzen beschrieben. Dabei wurden auch Tests - mit Blick auf lokale Anwendungen - mit Einfrequenzlösungen und ohne Bestimmung von Troposphärenparametern durchgeführt. An dieser Stelle sei bereits angemerkt, dass sich die Vernachlässigung des Dome-Einflusses auf die PCV in lokalen

Netzen jeweils im Bereich der Größenordnung der PCV-Veränderung auch in der Positionslösung (speziell Höhenkomponente) widerspiegeln kann (Abbildung 8.10).

### 8.2.2 Kurzzeitbeobachtung, Kinematik, verkippte Antennen

Neben den beschriebenen Untersuchungen von Langzeitbeobachtungen spielen vor allem Kurzzeitbeobachtungen in kleinräumigen Netzen eine große Rolle. Hier kann davon ausgegangen werden, dass eine hochauflösende PCV-Korrektur in jedem Fall vorteilhaft ist, da immer nur eine bestimmte Satellitenkonstellation genutzt wird. Somit werden nur partielle Ausschnitte aus dem PCV-Modell verwendet, ohne dass ein Mittelungseffekt eintritt. Reine Offset-Korrekturen und Korrekturen rein elevationsabhängiger PCV der relativen Feldkalibrierung sind für höchste Ansprüche dann nicht mehr ausreichend. Dies ist allerdings zusätzlich vom jeweiligen *phase pattern* einer Antenne abhängig. Beispielhaft wurden für die Veranschaulichung dieses Effektes die Beobachtungen aus obigem Versuch mit kürzeren Messzeiten ausgewertet. Vorgestellt werden die  $L_1$ -Positionslösungen bzw. Differenzen zu SOLL aus 0.5h-Blöcken für die Ashtech Marine Antenne ASH700700.B (Abbildung 8.6). Für diese durchaus gebräuchliche kurze Messzeit kann davon ausgegangen werden, dass kaum noch ein Einfluss durch Mehrwegeeffekte vorliegt und sich so deutlich die Unterschiede der PCV-Korrekturen in den Lösungen zeigen.

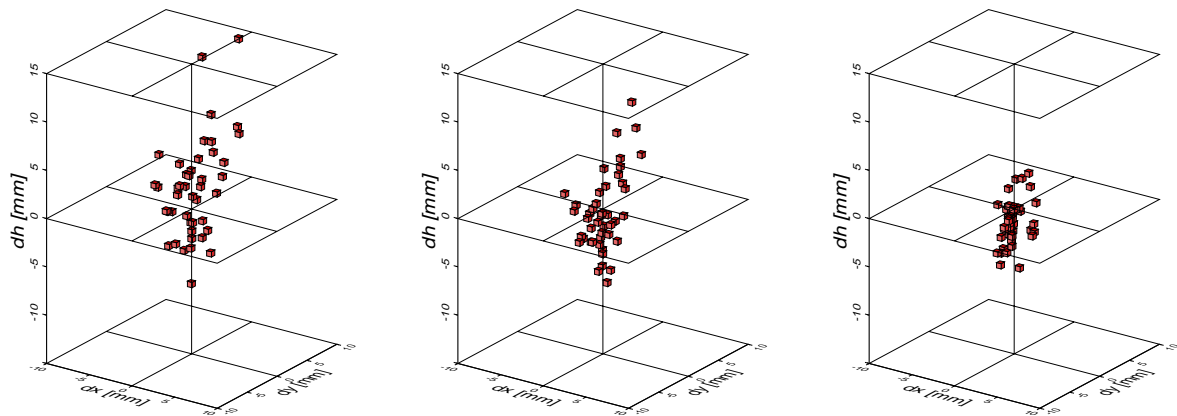


Abbildung 8.6: Variationen der Positionsbestimmung (Kurzzeit 0.5h,  $L_1$ ). Differenzen zur Soll-Position. Berücksichtigung Nur-Offset-Korrektur (*NGS*) (links), relativer elevationsabhängiger PCV (*NGS*) (Mitte), absoluter azimutal- und elevationsabhängiger PCV (*IfE*) (rechts). Antenne ASH700700.B mit signifikantem azimuthalen PCV-Pattern.

Es ist qualitativ gut zu erkennen, dass die Streuung der Position für die reine Offset-Korrektur am höchsten ist. Die Verwendung der elevationsabhängigen PCV des NGS zeigt Verbesserungen. Die kleinsten Variationen treten wie erwartet bei der Korrektur des hochauflösenden PCV-Vollmodells aus der Absoluten Feldkalibrierung auf. Der Effekt zeigt sich wiederum vor allem in der Höhenkomponente, aber auch geringfügig in der Lage. Dies wird in diesem Fall besonders deutlich, da die vorgestellte Antenne auch starke azimuthale Variationen aufweist (Abbildung 7.3). So tritt bei Kurzzeitmessungen durch die Nutzung nur eines kleinen unsymmetrischen Ausschnitts der Satellitenkonstellation ein Positionseffekt in Abhängigkeit des Antennenmodells auf. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich bei Simulationen für RTK-Messungen auf bewegtem Roboter, wobei durch das präzise PCV-Vollmodell neben einer geringeren Positionsstreuung auch eine schnelle Mehrdeutigkeitslösung gestützt wird (*Wübbena u. a. 2000a*).

In Tabelle 8.3 wird der quantitative Nachweis geführt. Die Standardabweichungen aus Differenzen und die maximal auftretenden Abweichungen bestätigen die getroffenen Aussagen am Beispiel dieser Antenne. Je besser das PCV-Korrekturmodell, desto geringere Variationen zeigen sich in der Koordinatenlösung. Das absolute Vollmodell zeigt mit knapp über 2 mm für die Höhenkomponente eine deutlich bessere Genauigkeit als das reine elevationsabhängige Modell des NGS mit knapp 4 mm. Zudem kann auch ein Effekt in der Lage erkannt werden. Die reine Offset-Korrektur fällt gegenüber den anderen Modellen klar ab. Bei den anderen Antennen aus diesem Versuch können auch kleinere Unterschiede zwischen den Ergebnissen mit verschiedenen Korrekturen auftreten. Andererseits sind aber auch größere Abweichungen bei stärker variierendem Empfangsverhalten bestimmter Antennentypen vorstellbar. Für Anwendungen im Zentimeterbereich sind die dargelegten Ergebnisse nicht von höchster Bedeutung. Für hochpräzise Anwendungen jedoch weist ein hochauflösendes PCV-Vollmodell in jedem Fall deutliche Vorteile auf. Dies wird in den maximalen Abweichungen besonders für die Höhenkomponente offensichtlich. Bei der reinen Offset-Korrektur liegt der Streubereich in der Größenordnung von 2 cm. Elevationsabhängige Korrekturen verkleinern den Streubereich auf ca. 1.5 cm. Das Vollmodell wiederum zeigt die kleinsten maximalen Abweichungen zur Soll-Lösung von ca.  $\pm 5$  mm. Auch in den Lagekomponenten sind - bei kleineren Abweichungen - ähnliche Verhältnisse ablesbar. Die mögliche Größenordnung ist also in jedem Fall signifikant für hochpräzise Messungen. Zudem kann sich durch die Verwendung der ionosphärenfreien Linearkombination  $L_0$  eine weitere Verschlechterung ergeben. Zweifrequenzlösungen werden auch im lokalen Bereich eingesetzt, zum Beispiel beim vernetzten RTK in Referenzstationsnetzen. Der Gebrauch hochauflösender PCV ist zudem aus fehlertheoretischer Sicht immer als vorteilhaft anzusehen (vgl. Abschnitt 4.5).

Tabelle 8.3: Beispiel für Genauigkeit der Positionsbestimmung (Kurzzeit 0.5h,  $L_1$ ) abgeleitet aus Differenzen zur Soll-Position. Berücksichtigung verschiedener Korrekturen. Antenne ASH700700.B mit signifikantem azimuthalen PCV-Pattern. (Mit  $H = x$ ,  $R = y$ ,  $h = z$ ).

Korrektur Elv. 10°, $L_1$	$s_0$ (x/y/z) [mm]	(max/min) (x/y/z) [mm]
Nur-Offset (NGS)	2.8 / 3.9 / 6.0	(6.4/-0.9) / (4.4/-9.2) / (18.4/-3.7)
Relative PCV (elv) (NGS)	2.4 / 3.7 / 3.9	(5.6/-0.7) / (3.4/-7.4) / (11.8/-4.7)
Nur-Offset (IfE)	1.5 / 3.2 / 5.3	(4.3/-3.0) / (5.6/-8.0) / (17.0/-5.0)
Absolute PCV (elv) (IfE)	1.2 / 2.9 / 3.8	(3.7/-2.6) / (4.7/-6.2) / (10.8/-5.9)
Absolute PCV (az/elv) (IfE)	0.9 / 1.7 / 2.4	(1.6/-1.7) / (2.8/-4.6) / (3.6/-6.6)

Neben den beschriebenen Lang- und Kurzzeitbeobachtungen in gemischten Basislinien spielt die PCV-Problematik - speziell absolute PCV - in einem weiteren Anwendungsbereich in lokalen Netzen eine wichtige Rolle. In kinematischen Anwendungen mit Orientierungsänderungen der Empfangsantenne müssen für höchste Positionsgenauigkeiten die PCV mit entsprechender Orientierungsinformation berücksichtigt werden. Dabei sind absolute PCV zwingend erforderlich, da relative Modelle nur für identische Orientierung der beteiligten Antennen gültig sind (vgl. auch Abschnitt 8.3). Mögliche Anwendungen sind zum Beispiel in der Maschinensteuerung, aber auch auf weiteren bewegten Plattformen wie Schiff, Eisenbahn u.a. zu finden. In Abhängigkeit der - oft nicht bzw. nicht in guter Qualität verfügbaren - Orientierungsänderungen und der genutzten PCV ergeben sich unterschiedliche Fehler in der Positionslösung.

Zum Nachweis des alleinigen Effektes durch die jeweiligen PCV wurde eine Simulation durchgeführt. Dabei wurden die Beobachtungsdaten aus einer absoluten Antennenkalibrierung mit Ro-



boter dupliziert. Diese simulierte Zero-Baseline wurde dann mit jeweils unterschiedlichen PCV-Modellen in beiden Datensätzen kinematisch ausgewertet. Auf diese Weise sind keine anderen Effekte wie zum Beispiel durch Mehrwegeausbreitung mehr in den Lösungen enthalten. Die Koordinaten der Zero-Baseline zeigen den reinen Unterschied der eingesetzten PCV-Modelle.

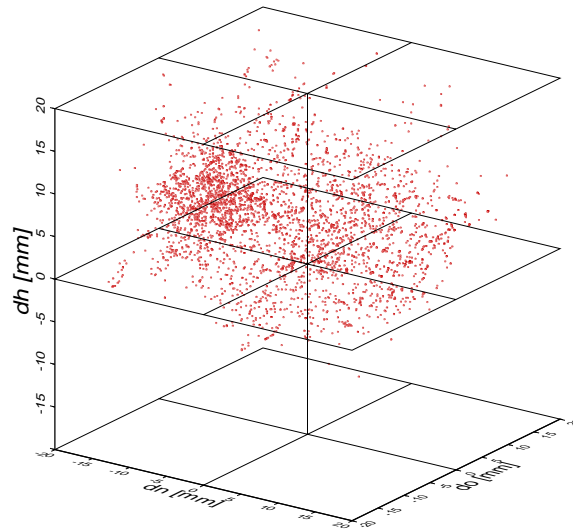


Abbildung 8.7: Unterschiedliche Orientierung einer Antenne. Kinematische Auswertung einer simulierten Zero-Baseline. Differenz in Position zwischen orientierter und nicht orientierter absoluter PCV-Korrektur ( $L_1$ , TRM22020.00-GP).

Tabelle 8.4: Ergebnisse der kinematischen Positionslösung ( $L_1$ ) einer simulierten Zero-Baseline. Unterschiedliche Antennenmodelle mit/ohne Orientierungsinformation. Nutzung von Daten einer Antennenkalibrierung auf Roboter (TRM22020.00-GP, 3.3 h).

<b>abs. PCV Modell</b>	Ergebnisse in [cm]	$L_1$ $s_{Pkt}$	$ \Delta_{max} (x/y/z)$	$L_X$ $s_{Pkt}$	$ \Delta_{max} (x/y/z)$	$L_0$ $s_{Pkt}$	$ \Delta_{max} (x/y/z)$
(az,elv) or. - (az,elv) n.or.		1.49	(3.6/2.4/3.3)	1.46	(2.9/2.2/2.9)	1.92	(7.9/3.3/5.3)
	(elv) n.or.	1.45	(3.7/2.0/3.5)	1.45	(3.1/1.9/3.1)	1.85	(7.1/2.8/5.5)
	(off) n.or.	1.54	(3.8/2.3/3.5)	1.51	(3.1/2.1/3.1)	1.93	(6.9/3.0/4.7)
(az,elv) or. - (az,elv) or.		-	-	-	-	-	-
	(elv) or.	0.55	(1.5/1.0/1.6)	0.42	(1.2/0.7/1.6)	1.02	(3.0/1.3/2.6)
	(off) or.	0.89	(2.8/1.7/3.4)	0.70	(2.2/1.4/3.0)	1.14	(5.5/1.7/4.8)
(az,elv) or. - (elv) <sub>rel</sub> or.		0.98	(3.5/1.8/3.6)	0.79	(2.6/1.3/3.3)	1.95	(6.7/2.7/5.7)

OR.=ORIENTIERT KORRIGIERTE PCV; N.OR.=NICHT ORIENTIERT KORRIGIERTE PCV

Die beteiligte Antenne war eine TRM22020.00-GP, die starke azimutale Variationen im Empfangsverhalten zeigt (Abschnitt 7.1). Die Messung (3.3 h, Datenrate 1 s) beinhaltete 4054 Orientierungsänderungen der Antenne mit maximalen Kippungen bis zu  $40^\circ$  (Abbildung 8.8 oben). Die Drehungen und Kippungen der Roboterbewegung während einer Antennenkalibrierung werden in einem definierten Punkt ausgeführt. Auf diesen Punkt wurden die PCV bzw. Offsets umgerechnet, so dass eine korrekte PCV-Reduzierung eine quasi-stationäre Position ergeben

muss. Als Referenz wurden in einem Datensatz orientierte absolute azimut- und elevationsabhängige PCV korrigiert. Im anderen Datensatz wurden jeweils andere - zunächst absolute - PCV-Korrekturmodelle orientiert und nicht orientiert berücksichtigt und Auswertungen mit verschiedenen Signalen ausgeführt (vgl. Tabelle 8.4).

Abbildung 8.7 zeigt für das  $L_1$ -Signal die Lage- und Höhenkomponenten der kinematischen Auswertung der simulierten Zero-Baseline für jede Epoche. Diese Differenzen zur Null-Position resultieren rein aus dem Unterschied der Vernachlässigung der Orientierungsinformation bei Nutzung des identischen absoluten PCV-Vollmodells. Es ist bereits qualitativ zu erkennen, dass - zumindest für diesen Antennentyp und mit diesen durchgeführten Orientierungsänderungen - Variationen im Bereich von 1-2 cm und teilweise auch mehr in allen Koordinatenkomponenten auftreten.

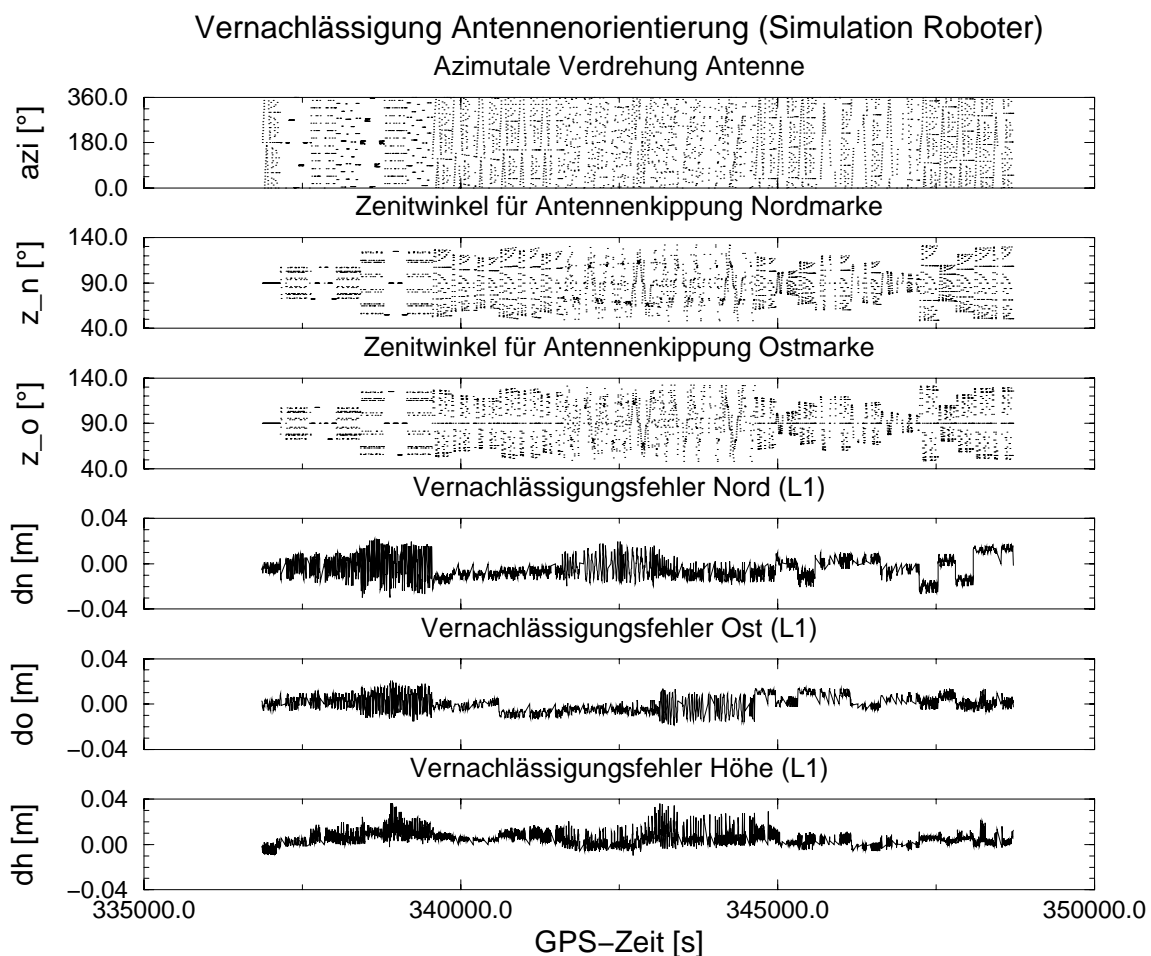


Abbildung 8.8: Unterschiedliche Orientierung einer Antenne. Kinematische Auswertung einer simulierten Zero-Baseline. Orientierungsangaben und Differenz in Koordinatenkomponenten zwischen orientierter und nicht orientierter absoluter PCV-Korrektur ( $L_1$ ). Positionslösungen zeigen die Größenordnung der Variation der Fehler bei Vernachlässigung der Orientierungsinformation in Anwendungen mit verkippter Antenne. Genutzter Antennentyp TRM22020.00-GP.

In Tabelle 8.4 werden Ergebnisse für  $L_1$ ,  $L_X$ ,  $L_0$  mit Punktfehlern und maximalen Variationen in der Basislinie dargestellt. Die Standardabweichungen wurden aus den Basislinienkomponenten

der Zero-Baseline abgeleitet und direkt als Differenzen zur Null-Koordinate (SOLL) aufgefasst. Als quadratisches Mittel der Standardabweichungen der Einzelkomponenten wurde daraus jeweils ein mittlerer Punktfehler abgeleitet. Auf Grund der sehr großen Stichprobe mit einer umfassenden Streuung an möglichen Orientierungen einer Antenne sind die Standardabweichungen als sehr realistisch anzusehen. Sie liegen bei allen PCV-Modellen für  $L_1$  bei ca. 1.5 cm und für  $L_0$  bei ca. 2 cm, wenn keine Orientierungsinformationen genutzt werden. Durch die Einführung der Orientierungsinformationen werden die Auflösungsunterschiede der verschiedenen Korrekturmodelle mit den größten Punktfehlern bei reiner Offset-Korrektur deutlich. Die auftretenden maximalen Differenzen zeigen mögliche Extremwerte für Abweichungen, wie sie beispielsweise bei RTK-Messungen auftreten können. Das Maximum von fast 4 cm bereits für das  $L_1$ -Signal bei Vernachlässigung der Orientierung und auch bei orientierten jedoch weniger präzisen Korrekturmodellen zeigt, dass hier Größenordnungen auftreten, die für hochgenaue Anwendungen nicht grundsätzlich vernachlässigt werden können.

Abbildung 8.8 zeigt für  $L_1$  getrennt nach Koordinatenkomponenten die Variationen zusammen mit den durchgeführten Orientierungsänderungen der Antenne (Azimut, Zenitwinkel Ost- und Nordmarke). Dabei können die vorgestellten Ergebnisse sicherlich als obere Grenze für auftretende Fehler gesehen werden. Es sind bei Antennentypen wie zum Beispiel Rover-Antennen mit relativ geringen Variationen oder anderen mit nur geringen azimutalen Variationen im Zusammenhang mit weniger extremen Orientierungsänderungen in jedem Fall auch kleinere Fehler zu erwarten. Die letzte Zeile in Tabelle 8.4 informiert über den Vernachlässigungsfehler - trotz vorhandener Orientierungsinformationen - für den Fall, dass relative rein elevationsabhängige PCV (hier: NGS) für diese Art der Anwendung verwendet werden. Punktfehler und Differenzen zeigen die Unterschiede zwischen absolutem Vollmodell und dem für Anwendungen mit Orientierungsänderungen der Antenne nicht geeigneten relativen PCV, die zudem noch eine geringere Auflösung aufweisen. Die Vernachlässigung des Absolutanteils der Referenzantenne und von azimutalen Variationen können für diese bewegte Anwendungen somit Fehler von 1-3 cm und teilweise mehr bewirken.

### 8.3 Regionale und großräumige Anwendungen

In großräumigen Netzen spielen weitere Einflussfaktoren im Zusammenhang mit dem Einsatz von PCV-Korrekturen eine Rolle. Zwischen entfernten Stationen sind Effekte durch Orbit- und Atmosphärenfehler nicht mehr identisch. Die PCV-Information hat hier eine besondere Bedeutung für die Trennung aller Fehlerkomponenten bzw. zur Schätzung der geometrischen und atmosphärischen Parameter und somit auch für eine zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung. Die zu beachtenden Besonderheiten des Zusammenspiels der notwendigen hochgenauen PCV-Korrektur (Empfänger **und** Satellit) sind in großräumigen Anwendungen:

- Antennenorientierung (*phase wind-up*; Notwendigkeit absoluter PCV)
- Atmosphäre (Troposphärenmodellierung; ionosphärenfreies Signal  $L_0$ )
- Stationsort (Konstellation; Breitenabhängigkeit; ... )
- Mehrdeutigkeitslösung (Parametertrennung)
- ...

Die einzelnen Effekte werden anhand verschiedener Messungen und Simulationen erläutert. Dabei spielt immer die Troposphärenmodellierung, speziell die Schätzung von zusätzlichen Troposphärenparametern, eine entscheidende Rolle. Wie bereits in Abschnitt 3.3 zusammengefasst wurde, sind Stationskoordinaten (Höhenkomponente), Troposphärenparameter und Phasenzentren von Empfangs- und Satellitenantennen hoch korreliert („Bermuda-Dreieck bzw. -Viereck“). Die schon im Vorabschnitt genutzten Beobachtungen in einem lokalen Netz mit gemischten Antennentypen werden dabei an dieser Stelle wiederum verwendet, um die Auswirkung von verschiedenen PCV-Modellen zusammen mit der Schätzung von Troposphärenparametern zu betrachten. Dieses Experiment war der Nachweis für große gemischte Netze, dass die Korrektur von PCV in hochgenauen Anwendungen notwendig ist. Die Besetzung von Stationen mit gemischten Antennentypen innerhalb eines Netzes zeigte, dass die alleinige Offset-Nutzung bei gleichzeitiger Schätzung von Troposphärenparametern Höhenfehler bis zu fast einem Dezimeter bewirken kann (z.B. Rothacher u.a. 1995, Menge u.a. 1998, Görres und Campbell 2001).

### 8.3.1 PCV und Troposphärenparameter - Auswirkung, Beispiele

Die Daten des lokalen Netzes (s.o.) wurden mit einer  $10^\circ$  Elevationsmaske und dem ionosphärenfreien Signal  $L_0$  ausgewertet. Gleichzeitig wurden stochastisch modellierte Troposphärenparameter (2h Korrelationslänge) für jede Station geschätzt. Vorteil dieser Testkonfiguration sind die bekannten Referenzkoordinaten (Höhenunterschiede aus Nivellement), was in regionalen oder globalen Netzen nicht der Fall ist. Dort werden die SOLL-Koordinaten ebenfalls aus GPS-Messungen oder anderen Raumverfahren abgeleitet und stehen nicht mit vergleichbarer Genauigkeit von  $< 1$  mm zur Verfügung. Terrestrische Messungen weisen für sehr ausgedehnte Netze keine ausreichende Genauigkeit auf bzw. sind wirtschaftlich ab einer bestimmten Netzgröße nicht mehr sinnvoll. Im vorliegenden Netz kommt hinzu, dass die troposphärischen Verhältnisse aller Stationen als identisch anzusehen sind. Eine fehlerhafte Troposphärenmodellierung würde auf allen Stationen gleich wirken. Somit können Ergebnisdifferenzen klar auf die Missmodellierung im Zusammenhang mit den eingesetzten PCV-Modellen zurückgeführt werden. Eine Beeinträchtigung der Ergebnisse ist nur über stark unterschiedliche Mehrwegefehler auf den beteiligten Stationen möglich. Diese Phasenverzögerungen können wie unkorrigierte PCV ebenfalls vom Troposphärenparameter fälschlicherweise aufgenommen werden. Auf dem Messdach sind bekanntermaßen Einflüsse durch Multipath vorhanden. Allerdings wird durch die langen Beobachtungszeiten (hier: 24h) und durch eine simultane Netzauswertung anstatt der Auswertung einzelner Basislinien ein Mittelungseffekt erreicht.

Abbildung 8.9 zeigt die Ergebnisse der 24h-Auswertung mit verschiedenen Korrekturmodellen jeweils als Differenz zur Sollhöhe. Die Koordinate von Pfeiler 8 wurde festgehalten. Die Resultate belegen, dass die Variationen der Differenzen zur jeweiligen Sollhöhe beim Einsatz eines hochauflösenden PCV-Modells am kleinsten sind. Die Trennung der PCV von der Schätzung der Troposphärenparameter gelingt hiermit am besten. Die Nutzung nur einer Offset-Korrektur zeigt wie erwartet die schlechtesten Ergebnisse mit Abweichungen bis zu 4 cm für diese Messungen. Die Ergebnisse für Pfeiler 7, der mit einer ähnlichen Antenne (Choke Ring mit Dorne Margolin Element) wie Pfeiler 8 besetzt war und somit nur geringe Unterschiede im Empfangsverhalten hat, weisen die kleinsten Differenzen auch für die alleinige Offset-Korrektur auf. In Tabelle 8.5 werden die Standardabweichungen, abgeleitet aus den Differenzen aller Pfeiler, für jedes Antennenmodell nachgewiesen.

Ein ähnlicher unabhängiger Vergleich mit relativen PCV-Korrekturen vom NGS und absoluten Roboterergebnissen für eine Basislinie von 100 km bestätigt die obigen Aussagen (Mader 2001).

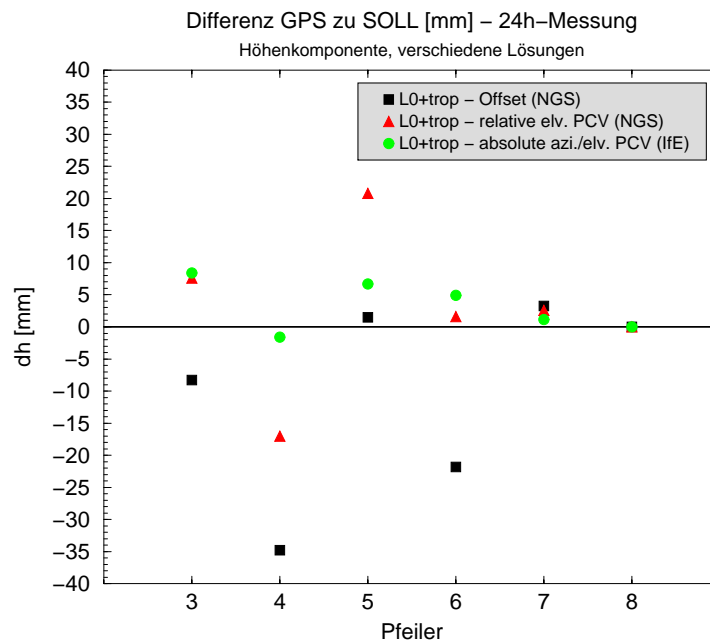


Abbildung 8.9: Gemischtes Netz Messdach. 24h-Auswertung, kurze Basislinien, verschiedene PCV-Modelle. Auswirkung Troposphärenmodellierung. Beispiel für Signal  $L_0 + \text{trop}$ .

Tabelle 8.5: Beispiel für Genauigkeit der Höhenkomponente (24h,  $L_0 + \text{trop}$ ) abgeleitet aus Differenzen zur SOLL-Position. Gemischtes Netz, beispielhaft mit kurzen Basislinien.

Korrektur Elv. 10°, $L_0 + \text{trop}$	s (h) [mm]
Nur-Offset (NGS)	17.2
Relative PCV (elv) (NGS)	11.5
Absolute PCV (azi/elv) (IfE)	4.9

Allerdings wurden dort jeweils diejenigen Beobachtungsdaten verwendet, die auch für die Ableitung der relativen PCV verwendet wurden. Da speziell relative Kalibrierungen ohne azimuthale Drehungen Einflüsse durch Multipath enthalten, ist für diese Auswertungen eine vollständige Unabhängigkeit des Vergleichs nicht mehr gänzlich gegeben. Diese Effekte sind während der Relativkalibrierung praktisch für jede Antenne und Beobachtungstag in den Kalibrierungsergebnissen enthalten und werden nachträglich somit wieder als Korrektur an die identischen Daten angebracht. Dieser Umstand erklärt, warum die rein elevationsabhängigen PCV des NGS im Vergleich zu den hier vorgestellten Ergebnissen teilweise bessere Resultate lieferten.

Ein weiterer Aspekt hinsichtlich der Problematik korrelierter Parameter und deren Trennung ergibt sich aus den verschiedenen Auswertoptionen während der Untersuchungen. Die Ergebnisse bei unterschiedlicher Wahl der Elevationsmaske - ohne Abwichtung bei kleinen Winkeln - bestätigen deutlich die erwartete Stützung der Höhenkomponente durch Hinzunahme von mehr Beobachtungen hin zum Horizont. In Tabelle 8.6 finden sich beispielhaft die Ergebnisse, die mit den Korrekturen des NGS erzielt wurden. Die größten Verbesserungen der Höhenkomponente ergeben sich bei der Offset- und auch bei der PCV-Korrektion von 15° auf 10° und nochmals in

Tabelle 8.6: Beispiel für Genauigkeit der Höhenkomponente (24h,  $L_0 + \text{trop}$ ) abgeleitet aus Differenzen zur SOLL-Position. Gemischtes Netz mit kurzen Basislinien. Variation Elevationsmaske. Beispielhaft Offsets bzw. elevationsabhängige PCV vom NGS.

<b>Korrektur (<math>L_0 + \text{trop}</math>)</b> Lsg. A: Nur-Offset (NGS) Lsg. B: PCV (elv,rel.) (NGS)	<b>s (h), Lsg. A [mm]</b>	<b>s (h), Lsg. B [mm]</b>
Elevationsmaske 00°	12.6	4.5
Elevationsmaske 05°	13.4	5.6
Elevationsmaske 10°	17.2	11.5
Elevationsmaske 15°	27.6	21.5
Elevationsmaske 20°	33.3	23.6

einem etwas kleineren Schritt hin zu einer 5° Elevationsmaske. Dies ist besonders interessant, da die NGS-Offsets für 15° optimiert sind und die PCV nur bis 10° abgeleitet werden und darunter für diese Auswertung extrapoliert wurden. Es wird deutlich, dass die horizontnahen Beobachtungen trotz schlechterer Datenqualität noch eine entscheidende Rolle für die Höhenbestimmung spielen. Die Ableitung von PCV für diesen Bereich ist auch für statische hochpräzise Anwendungen in großräumigen Netzen sinnvoll, auch wenn sie verminderte Qualität in Horizontnähe aufweisen.

Tabelle 8.7: IGS-Stationen in Simulation Dome-PCV und Breitenabhängigkeit.

<b>IGS-Station</b>	<b><math>\phi</math> [°]</b>	<b>Antenne</b>
VESL	-71.67	TRM29659.00
KERG	-49.35	TRM29659.00
GOUG	-40.35	TRM29659.00
HARB	-25.89	TRM29659.00
THTI	-17.58	TRM29659.00
NKLG	-0.35	TRM29659.00
SLOR	13.42	TRM29659.00_SCIS
INEG	21.86	TRM29659.00
RABT	33.98	TRM29659.00_SCIS
MATE	40.65	TRM29659.00
GLSV	50.36	TRM29659.00
HOFN	64.27	TRM29659.00

Die Missmodellierung von PCV durch Troposphärenparameter wird an einer anschaulichen und vor allem praxisnahen Simulation deutlich. Es wird der Einfluss von PCV-Veränderungen durch einen Dome auf die Höhenkomponente in einem globalen Netz dargestellt. Als Antenne wurde die Trimble Choke Ring mit kleinem SCIGN-Dome (TRM29659.00\_SCIS) gewählt, für die mit und ohne Dome Kalibrierungsergebnisse am IfE vorliegen. Es wurden Beobachtungsdaten eines Tages von solchen IGS-Stationen genutzt, die sämtlich mit diesem Antennentyp (mit oder ohne Dome) besetzt und relativ regelmäßig in Nord-Süd-Richtung global verteilt sind (Tabelle 8.7). Durch die Lösung einer simulierten Zero-Baseline für jede Station durch Datenduplizierung ist die reine Betrachtung der Auswirkung der PCV ohne die anderen entfernungs- und stationsabhängigen Einflüsse möglich. Auf jeder Station wurden dabei jeweils in einem Datensatz die PCV-Korrekturen für die TRM29659.00 mit Dome und im anderen Datensatz für die TRM29659.00 ohne Dome

eingeführt und mit verschiedenen Signalen und Optionen ausgewertet. Durch die globale Verteilung der Stationen war zudem möglich, eine Breiten- und somit Konstellationsabhängigkeit der PCV-Korrekturen zu betrachten.

In Abbildung 8.10 ist die Höhenkomponente der Zero-Baseline dargestellt, da durch die Form des Dome speziell die elevationsabhängigen Korrekturen betroffen sind. Azimutal sind der Dome bzw. die Veränderungen der PCV symmetrisch aufgebaut. Die Höhenkomponente zeigt somit den reinen PCV-Effekt zwischen den Lösungen mit und ohne Dome-Berücksichtigung ( $L_1$ ,  $L_0$ ,  $L_0 + \text{trop}$ ). Als weiterer Einflussfaktor tritt nur noch der Stationsort (Konstellationsabhängigkeit) auf. Die Größenordnung des Effektes auf die Position für  $L_1$  und  $L_0$  im Bereich einiger Millimeter spiegelt die im Vorkapitel beschriebenen Größenordnungen der PCV durch diesen speziellen Dome wider (Abbildung 7.17). Durch die Schätzung eines Troposphärenparameters, hier eines stochastischen Parameters mit 2h Korrelationslänge, bei gleichzeitiger Nutzung der ionosphärenfreien Linearkombination  $L_0$  treten für diese Stationen Höheneffekte bis zu 2 cm auf. Die Vernachlässigung der durch einen Dome veränderten PCV können somit für hochpräzise Anwendungen signifikant große systematische Fehler auslösen, die in jedem Fall zu beachten sind.

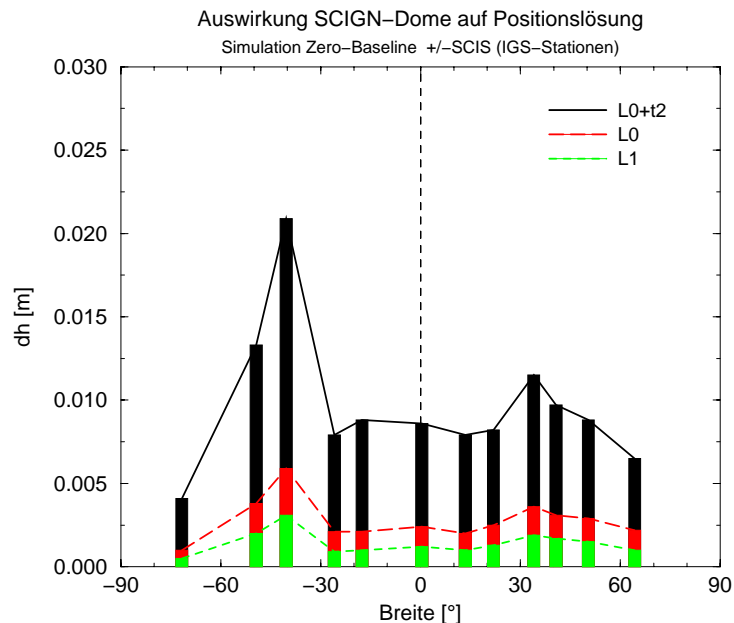


Abbildung 8.10: Auswirkung der Vernachlässigung von PCV-Veränderungen durch den SCIS-Dome auf die Koordinatenlösung am Beispiel verschiedener IGS-Stationen. Unterschiede der Auswertungen simulierter Zero-Baseline-Messungen jeweils mit und ohne Berücksichtigung des SCIS-Dome.

Eine wichtige Tatsache ist die erwartete und im Beispiel klar erkennbare Abhängigkeit des Positionseffektes von der geographischen Lage der jeweiligen Station. An dieser Stelle soll nicht speziell die Notwendigkeit absoluter PCV in großen Netzen wegen unterschiedlicher Richtungen gleichzeitig empfangener Satellitensignale behandelt werden. Dieses wird später in diesem Abschnitt dargestellt. Durch obige Simulation zeigt sich jedoch der absolute Effekt verschiedener Satellitenkonstellationen auf den Stationen. Das sog. Nordloch verschiebt sich in Abhängigkeit der geographischen Breite. Dadurch werden je nach Station unterschiedliche Ausschnitte der Antennen-PCV korrigiert bzw. nicht korrigiert. In Verbindung mit den richtungsabhängigen Variationen und Größenordnungen der jeweiligen Dome-PCV ergeben sich bei deren Vernachlässigung

sigung unterschiedliche Positionsauswirkungen. Dies zeigte sich bereits für den hier genutzten Dome-Typ in Untersuchungen anderer Gruppen, wobei die Erklärung auf Grund zunächst fehlender hochauflösender Antennenkalibrierungen auf andere Stationsfehler wie Multipath beruhte. Im SCIGN-Permanentnetz wurde dieser Dome entwickelt und zunächst eingesetzt, ohne dass sich große Positionseffekte trotz Nicht-Berücksichtigung spezieller PCV-Korrekturen zeigten. Die Problematik wurde ersichtlich, als der Dome-Typ weltweit auf anderen Stationen genutzt wurde und starke Höhengsprünge in den Koordinatenzeitreihen auftraten (*Hudnut u.a. 2002*). Die dargestellte Simulation bestätigt, dass sich die starken Gradienten der SCIS-Dome-PCV unterschiedlich auf verschiedenen global verteilten Stationen auswirken. Abgesehen von dieser Konstellationsabhängigkeit ist bereits länger bekannt, dass für hochpräzise Anwendungen die speziellen PCV-Änderungen durch einen Dome berücksichtigt werden müssen. Die Koordinateneffekte in Permanentnetzen sind gravierend (*Völksen und Menge 2002*). Hochauflösende absolute PCV werden in diesem Anwendungsgebiet (IGS, EUREF, ... ) aber zur Zeit - ausser experimentell - noch kaum eingesetzt. Dies wird sich mit der Klärung der Problematik absoluter PCV (vgl. unten) und dem Übergang auf absolute Korrekturen im IGS (*Moore und Weber 2002*) in jedem Fall ändern.

### 8.3.2 Anmerkungen zur Mehrdeutigkeitsproblematik und PCV

Neben der Auswirkung der (Nicht-)Korrektur verschiedener PCV-Modelle im Positionsraum spielt die Nutzung ebenso eine Rolle für die Güte und Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitsbestimmung. Dies soll anhand einer beispielhaften Auswertung gezeigt werden. Die Korrektur der PCV im Zusammenhang mit einer schnellen Mehrdeutigkeitslösung ist in besonderem Maße in folgenden Anwendungen erforderlich:

- Einsatz gemischter Antennentypen
- Regionalnetze
- Kurzzeit- bzw. Echtzeitanwendungen

Tabelle 8.8: Beispielnetz SAPOS<sup>®</sup> Niedersachsen. Echtzeitsimulation betreffend TTFA und PCV.

Station	Ort	Antenne
Referenznetz		
0652	Alfeld	TRM33429.20+GP
0657	Hamel	TRM33429.20+GP
0663	Hildesheim	TRM33429.20+GP
0665	Schwarmstedt	TRM33429.20+GP
0666	Nienburg	TRM33429.20+GP
0676	Celle	TRM33429.20+GP
0682	Braunschweig	TRM33429.20+GP
Roverstationen		
0640	Hannover (LGN)	TRM33429.20+GP
msd4	Hannover (Messdach)	ASH700228.D
msd5	Hannover (Messdach)	TRM22020.00-GP
msd6	Hannover (Messdach)	ASH700700.B



In Abhängigkeit von der Größe der PCV-Differenzen zwischen den genutzten Antennentypen und einer möglichen Vernachlässigung bei der Korrektur ist mit Auswirkungen auf den Prozess der Mehrdeutigkeitslösung zu rechnen. In Netzen mit längeren Basislinien ist eine präzise Berücksichtigung besonders wichtig, um die Trennung der verschiedenen Parameter zu vereinfachen und systematische Effekte zu vermeiden (Beispiel Troposphäre und PCV). Zudem können sich PCV-Fehler durch die notwendige Bildung von Linearkombinationen für die Mehrdeutigkeitslösung verstärken. In globalen Netzen werden statische Langzeitbeobachtungen, abgesehen von Teillösungen, i.d.R. als *float*-Lösung berechnet, sodass vor allem Regionalnetze betroffen sind. Schließlich wird die Qualität und Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitsbestimmung besonders in Kurzzeit- bzw. Echtzeitanwendungen beeinträchtigt, da hier nur jeweils ein kleiner Ausschnitt einer möglicherweise sehr unsymmetrischen Satellitenkonstellation verwendet werden kann. Ohne eine Mittelbildung über eine längere Beobachtungszeit wirkt sich eine Vernachlässigung von PCV für diese Bereiche stärker aus.

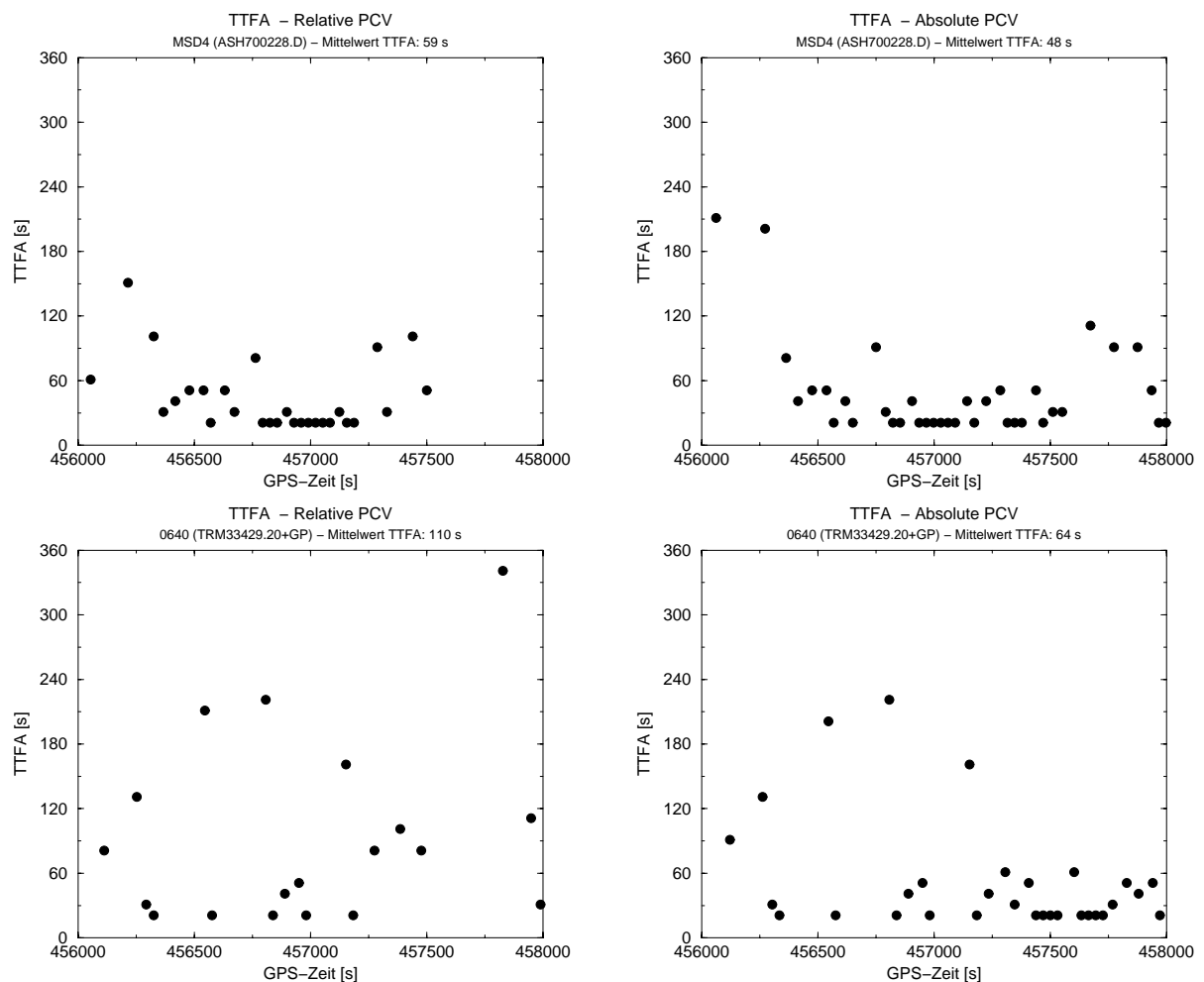


Abbildung 8.11: Beispiele TTFA aus Echtzeitsimulation betreffend PCV-Modell. Geodätische Antennen.

Eine sämtliche Punkte betreffende Anwendung ist somit die Echtzeitvernetzung eines regionalen Referenznetzes und die Positionsbestimmung für eine Roverstation. Am Beispiel einiger niedersächsischer SAPOS<sup>®</sup>-Stationen und verschiedener Roverstationen kann ein Effekt in Abhängigkeit vom genutzten Modell gezeigt werden. Dabei wird nur die Geschwindigkeit der Initialisierung

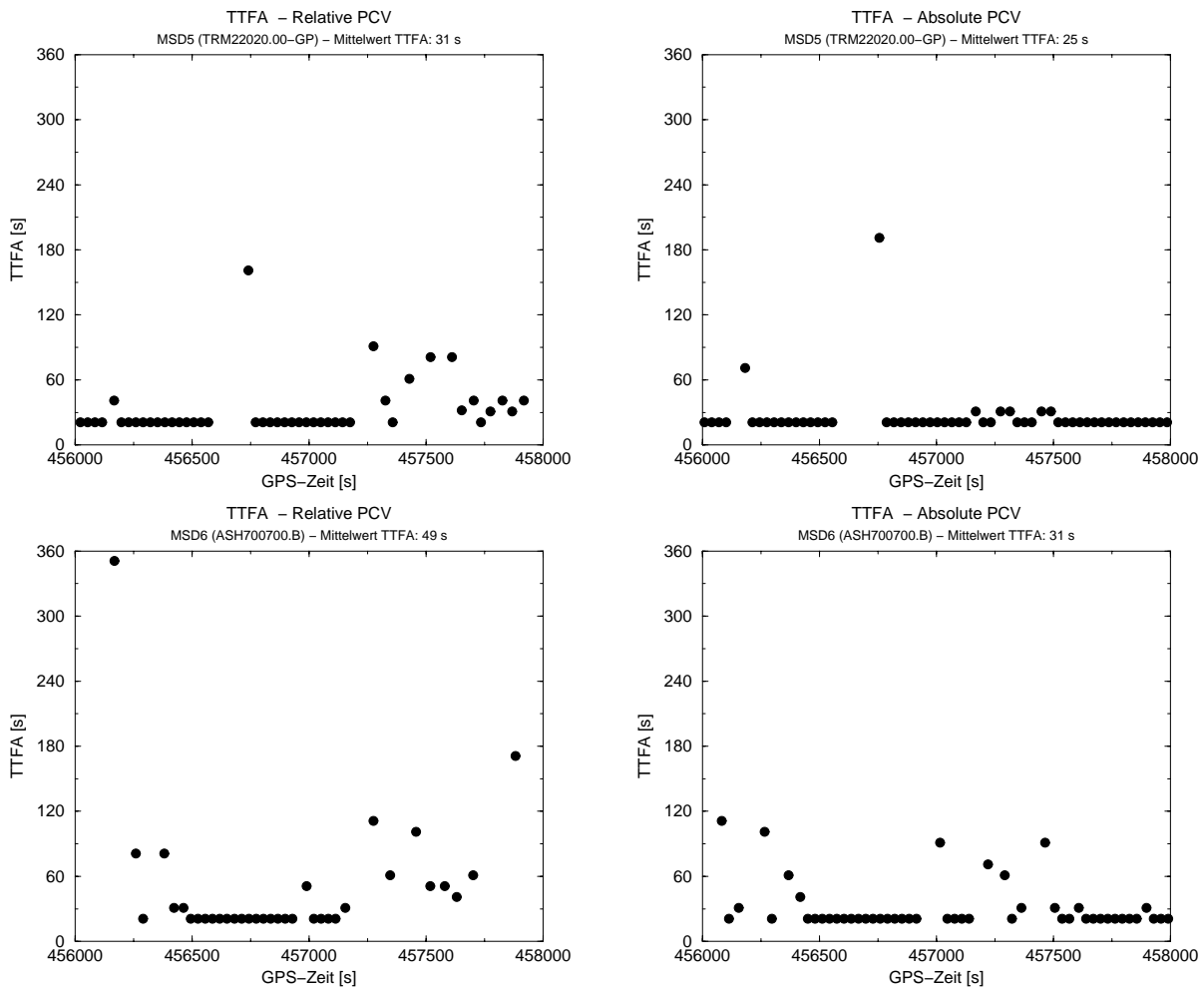


Abbildung 8.12: Beispiele TTFA aus Echtzeitsimulation betreffend PCV-Modell. Rover-Antennen.

(*Time-To-Fix-Ambiguities TTFA*) betrachtet, wobei die Nutzung eines individuellen, hochauflösenden Absolut-PCV-Modells mit der Verwendung eines rein elevationsabhängigen Relativmodells (Typkalibrierung NGS) verglichen wird. Dies repräsentiert eine realistische Anwendung, da eine reine Offset-Nutzung für diese präzise Positionsbestimmung nicht angebracht ist. Es werden Untersuchungen der Daten eines Tages (Juni 2001) von 7 Referenz- und 4 Roverstationen (Tabelle 8.8) dargestellt. Als eine Roverstation wurde die Station Hannover (0640) eingesetzt, die den identischen Antennentyp wie im umliegenden Referenznetz aufweist. Die anderen drei unterschiedlichen Antennentypen wurden parallel auf dem Messdach der Universität betrieben. Die Ausdehnung des Netzes beträgt ungefähr 75 km in Nord-Süd- und 90 km in West-Ost-Richtung mit Basislinienlängen zwischen 20 und 100 km (Abbildung 8.13). Dabei sind die Abstände zum Rover relativ groß.

Die Auswertung der 1 s-Daten erfolgte mit dem Programmpaket GNRT/GNNET als Echtzeitsimulation im Post-Processing. Die Parametrisierung, die auftretenden Datenströme und die Korrekturdaten sind identisch mit der in Echtzeit beispielsweise im niedersächsischen SAPOS<sup>®</sup>-Netz eingesetzten Software-Variante. Es wurde eine streng-simultane Zweifrequenzauswertung durchgeführt. 10 s nach erfolgreicher Mehrdeutigkeitslösung, die Koordinaten wurden auf Richtigkeit überprüft, wurde durch ein RESET jeweils ein Neustart zur Mehrdeutigkeitsbestimmung aus-

gelöst. Die Initialisierungszeiten können so später für die Gesamtmessdauer untersucht werden. An dieser Stelle muss betont werden, dass es nicht Ziel dieser Experimente war, die Algorithmen und Modelle der Software zu prüfen, die sich bereits in operationeller Anwendung bewähren. Dafür wird auf theoretische und praktische Untersuchungen u.a. in *Wübbena und Willgalis (2001)*, *Wübbena u.a. (2001)*, *Böder (2002)* verwiesen. Hier war lediglich die Betrachtung der Auswirkungen von differentiellen Unterschieden der Antennenkorrekturen auf die Initialisierungszeit für die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten das Ziel. Durch die Verwendung identischer Daten und einer identische Auswertung spiegeln die Ergebnisse somit nur den Einfluss des Antennenmodells für Rover- und geodätische Antennen wieder. Die Absolutwerte der TTFA hingegen beinhalten ebenso die Problematiken der Atmosphären- und Mehrwegeeffekte für die Referenznetz- wie auch für die Rover-Lösung. Aus diesem Grund werden beispielhaft Ergebnisse mit Schwerpunkt auf die TTFA präsentiert.

Tabelle 8.9: Beispiele TTFA aus Echtzeitsimulation betreffend PCV-Modell.

Station (PCV-Modell)	TTFA [s] Block: 30min	Verbesserung [%]	TTFA [s] Block: 6h	Verbesserung [%]
0640 (rel)	59		117	
0640 (abs)	48	19	92	21
msd4 (rel)	31		52	
msd4 (abs)	25	19	38	27
msd5 (rel)	49		80	
msd5 (abs)	31	37	72	10
msd6 (rel)	110		85	
msd6 (abs)	64	41	50	41
Mittel (rel)	62		83	
Mittel (abs)	42	32	63	25

Die Abbildungen 8.11 und 8.12 sowie Tabelle 8.9 zeigen klar Differenzen der Initialisierungszeiten zwischen Relativ- und Absolut-PCV-Modell. Absolut liegen die Werte der TTFA für diese Beispiele im Bereich zwischen 0.5 - 2 min. Da die Verhältnisse im Referenznetz für beide Auswertungen identisch sind, wird deutlich, dass individueller Multipath auf den Stationen wirksam ist und die Zeiten erwartungsgemäß zusätzlich zum PCV-Effekt beeinflussen. Dies ist offensichtlich auf Station 0640 der Fall. Trotz identischem Antennentyp wie im Referenznetz treten vergleichsweise längere Zeiten für die TTFA auf, selbst gegenüber Rover-Antennen. Partiiell sind längere Zeiten für Relativ- wie auch für Absolut-PCV-Modell in gleichen Zeitabschnitten zu beobachten, was auf Referenznetz- und Mehrwegeeffekte schließen lässt. Ansonsten treten klare Verbesserungen durch die hochauflösende Antennenkorrektur auf. Abgesehen von der Mehrwegeausbreitung sind Variationen der TTFA auf Grund des eingesetzten Antennentyps und somit der Größe des Vernachlässigungsfehler durch ein rein elevationsabhängiges Relativmodell jeweils in Verbindung mit aktueller Satellitengeometrie zu erwarten. Die Geschwindigkeit einer korrekten Mehrdeutigkeitslösung kann mit dem individuellen Absolutmodell durchschnittlich um 25% gesteigert werden. Ähnliche Ergebnisse finden sich in operationellen realen Echtzeituntersuchungen im niedersächsischen SAPOS<sup>®</sup>-Netz (*Jahn u.a. 2001*).

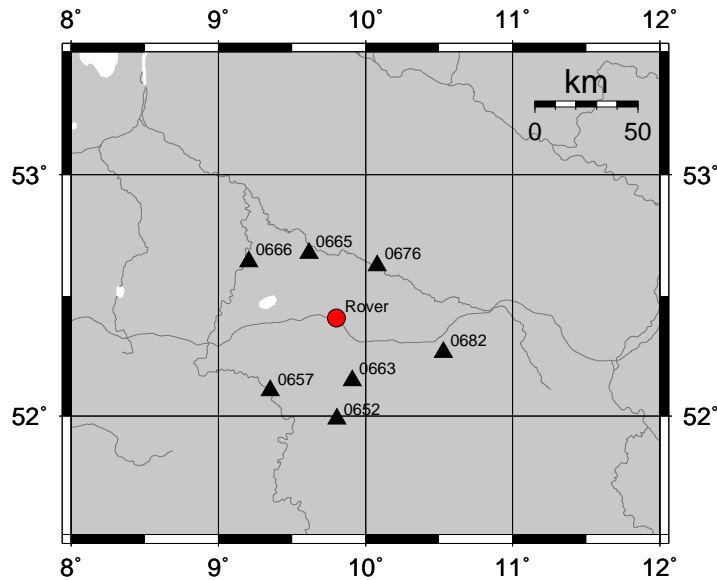


Abbildung 8.13: Beispielnetz SAPOS<sup>®</sup> Niedersachsen für Echtzeitsimulation betreffend TTFA und PCV-Modell.

### 8.3.3 Absolute PCV - Netzmaßstab, Troposphäre, Satelliten-PCV

Neben der dargestellten im Zusammenhang mit PCV zu sehenden Problematik der Troposphärenmodellierung, der gezeigten Konstellationsabhängigkeit und auch der Geschwindigkeit der Mehrdeutigkeitslösung muss die Notwendigkeit absoluter PCV-Information in ausgedehnten Netzen näher beschrieben werden. Im Folgenden wird die Auswirkung der Nutzung relativer und absoluter PCV-Modelle speziell untersucht. Wie bereits allgemein erörtert wurde, sind absolute PCV immer dann einzusetzen, wenn Orientierungsunterschiede zwischen den Antennen vorliegen. Ein Relativmodell setzt die Gleichausrichtung zwischen den Antennen voraus. Es kann nicht in Anwendungen mit gegeneinander verkippten Antennen und somit auch nicht fehlerfrei in globalen Netzen verwendet werden. Die Größenordnung des Vernachlässigungsfehlers - absolut auf einer Station betrachtet - lässt sich mit einer Simulation abschätzen (Abbildung 8.14).

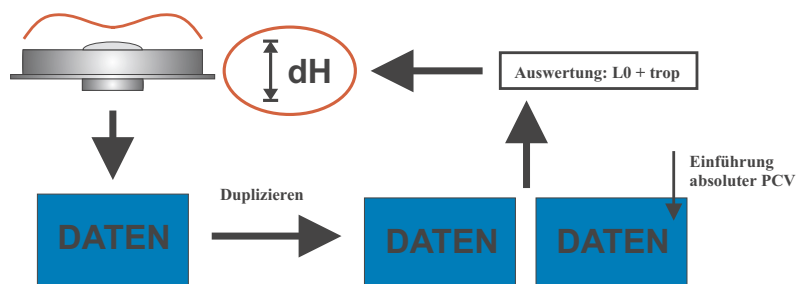


Abbildung 8.14: Versuchsaufbau zur Darstellung der Auswirkung absoluter PCV. Simulation einer Zero-Baseline. Differenz der Positionslösung mit/ohne absolute PCV. Genutzter Antennentyp AOAD/M\_T.

Ein Datensatz (24h) der IGS-Station WTZR (AOAD/M\_T) wurde dupliziert und als simulierte Zero-Baseline ausgewertet. Durch die Vorgehensweise, die bereits mehrfach angewendet wurde, werden alle möglichen Fehler vom GPS ausgeschlossen. Für einen Datensatz wurde entsprechend der Verwendung relativer PCV die IGS-Offset-Definition und somit keine weiteren PCV für diesen Antennentyp korrigiert. Der zweite Datensatz wurde mit absoluten PCV aufdatiert. In der Auswertung mit der ionosphärenfreien Linearkombination  $L_0$  wurde ein stochastischer Troposphärenparameter geschätzt. Die Koordinatenunterschiede (Höhe) für die Zero-Baseline betragen ohne Schätzung des Troposphärenparameters erwartungsgemäß etwas mehr als 2 cm, also in etwa im Bereich der absoluten Variationen der AOAD/M\_T mit Bezug auf die festgelegten IGS-Offsets (Abschnitt 6.2). Mit geschätzten Troposphärenparametern ergibt sich eine Differenz in der Höhenkomponente von mehr als 8 cm. Dies zeigt den Effekt der absoluten im Vergleich mit den relativen PCV in großen Netzen, wobei sich für andere Stationen mit anderen Konstellationen nicht exakt identische Lösungen ergeben werden. Die Größenordnung von knapp einem Dezimeter spiegelt sich auch in realen Netzauswertungen wieder, die im Folgenden dargestellt werden.

Am Beispiel einer realen Auswertung einiger ausgewählter IGS-Stationen kann der Effekt im globalen Netz aufgezeigt werden. Dabei wurden Stationen mit - zum Zeitpunkt der Auswertung - identischen AOAD/M\_T-Antennen gewählt, um den Effekt bei bzw. trotz Nutzung gleicher Antennen zu verdeutlichen. Dabei wurde erst ein europäisches Netz (ANKR, MADR, MATE, WTZR, ZWEN) mit Basislinien zwischen 1000 und 2000 km gebildet, welches später um die Stationen ALGO, ASC1, KOUR und REYK erweitert wurde (Abbildung 8.15 links). Auf diese Weise entstanden Basislinienlängen von über 8600 km. Die Auswertung wurde wieder mit GEONAP durchgeführt. Es wurden zwei bis auf die PCV-Korrekturen identische Ausgleichungen durchgeführt, jeweils als 24h-Float-Lösung mit der ionosphärenfreien Linearkombination  $L_0$ , der Schätzung von stochastischen Troposphärenparametern mit 2h-Korrelationslänge, mit festgehaltenen präzisen Ephemeriden des IGS und einer Elevationsmaske von  $10^\circ$ . Prinzipiell wurde somit eine Standardauswertung für globale Netze gefahren. Einziger Unterschied der beiden Auswertungen war die ledigliche Nutzung der IGS-Offsets für den einen und die Einführung absoluter PCV aus der Feldkalibrierung für den anderen Auswertelauf. Um den zu erwartenden Effekt exakt nachzuvollziehen und um keine weiteren Zwänge wie Netzmaßstab o.ä. einzuführen, wurde allein die Station WTZR festgehalten.

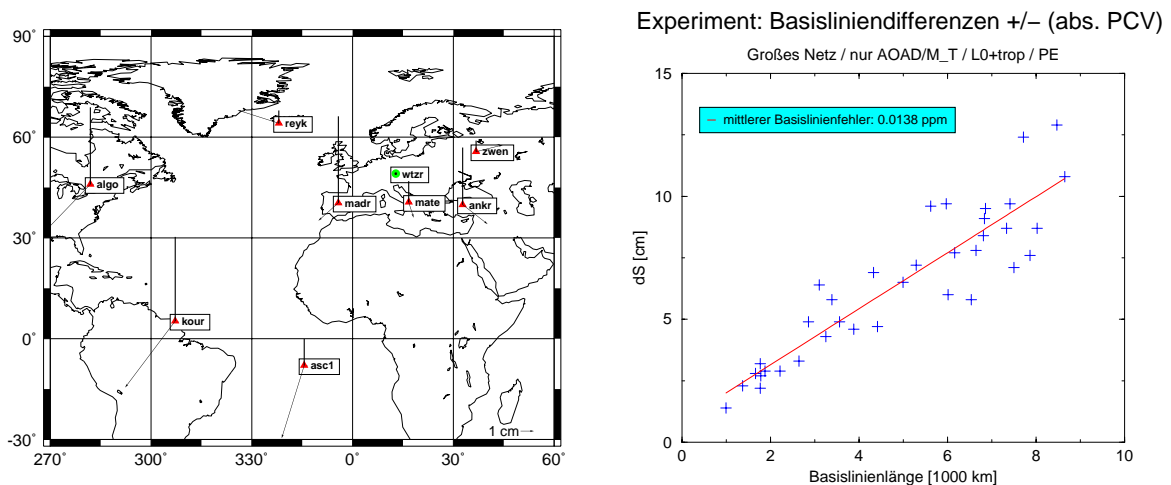


Abbildung 8.15: Auswirkung absoluter PCV im globalen Netz (IGS-Stationen). Unterschiede zwischen Lösungen mit/ohne absolute PCV (links). Basisliniendifferenzen von ca. 14 ppb (rechts).

Im Vergleich beider Lösungen treten erhebliche Unterschiede auf, wie die Differenzvektoren in Abbildung 8.15 links zeigen. Diese entstehen nur auf Grund der verschiedenen PCV-Modelle und deren Auswirkung im globalen Netz durch die unterschiedliche Orientierung der - hier identischen - Antennen und die Richtungsabweichungen auf den Stationen für gleichzeitig empfangene Satelliten. Maximale Elevationsdifferenzen sind über einfache geometrische Beziehungen leicht zu berechnen (*Wanninger 2000*). Im europäischen Netz treten bereits Richtungsunterschiede gleichzeitig empfangener Satelliten bis zu  $20^\circ$  auf, wie die Datensätze zeigen. Es ergeben sich Differenzen einzelner Koordinatenkomponenten bis zu 3.5 cm, im gesamten Netz bis zu teilweise 7 cm. Als Effekt erster Ordnung tritt eine Maßstabsveränderung im Bereich von 0.014 ppm auf (Abbildung 8.15 rechts). Bisher wurde dieser selbstverständlich auch bei absoluten PCV aus Kammermessungen bekannte Effekt als Fehler im absoluten PCV-Modell beschrieben (*Rothacher u.a. 1995*), denn der Unterschied zwischen GPS-Lösung mit relativen PCV und Lösung anderer Raumverfahren wie VLBI und SLR liegt mit 1-2 ppb eine Größenordnung besser (*Springer 1999*).

Die ähnlichen Ergebnisse der auf gänzlich unabhängigen Verfahren beruhenden absoluten PCV aus Kammer- und Roboterkalibrierung belegen, dass hier ein anderer nicht erfasster systematischer Fehler Auslöser sein muss. Zudem belegen die Vergleiche und Umrechnungen zwischen relativen und absoluten PCV deren Überführbarkeit ineinander und somit die Konsistenz der Verfahren. Für einen durchgreifenden Nachweis der Richtigkeit der absoluten PCV und ihrer Korrekturwirkung wurden Simulationsmessungen mit dem Roboter durchgeführt. Dabei wurde durch Orientierungsänderung der Antenne der Konstellationsunterschied zwischen entfernten Stationen simuliert. Ein Soll-Wert für die Basislinie war durch die Messung in Nullposition genau bekannt. Durch diese Messanordnung sind alle weiteren entfernungsabhängigen GPS-Fehlereinflüsse praktisch eliminiert, da sie auf beiden Stationen gleich wirken. Drehungen und die Kippungen nach Norden und Süden von bis zu  $40^\circ$  wurden im mittleren IGS- $L_0$ -Phasenzentrum von 8.2 cm über ARP (Höhenkomponente) der genutzten AOAD/ $M\_T$  durchgeführt, sodass für das IGS-Modell analog der Situation im globalen Netz in der Auswertung keine Korrekturen mehr eingeführt werden mussten. Die absoluten PCV mit Bezug auf den genannten Drehpunkt wurden für jede 24h-Session orientiert korrigiert. Die Messungen entsprechen nicht gänzlich den Verhältnissen im globalen Netz, da im Versuch die gesamte Konstellation durch die Roboterbewegung gleichermaßen verschoben wird. Im tatsächlichen Netz hingegen ergeben sich zusätzliche Konstellationsveränderungen zwischen den Stationen. Dies ist für den Nachweis an dieser Stelle allerdings unerheblich. Wichtig ist die Ausschaltung der GPS-Fehlerquellen und eine exakt bekannte SOLL-Lösung.

Die Simulation zeigt den erwarteten Effekt wie im tatsächlichen Netz, dass relative PCV nicht für gegeneinander verkippte Antennen geeignet sind (Abbildung 8.16). Mit absoluten PCV verbleibt die Lösung in der Ausgangskoordinate. Die Lösungen mit IGS-Offset und somit relativer PCV-Korrektur hingegen zeigen mit stärkerer Kippung eine größer werdende Höhendifferenz. Die Abschätzung über eine Kugel mit Radius 6371 km ergibt für die Höhenfehler den o.g. Maßstab von 14 ppb aus dem realen Netz bzw. umgekehrt ergeben sich aus dem Maßstab die tatsächlich in der Simulation auftretenden Höhenfehler. Ein Maßstab von 14-15 ppb entspricht einer globalen Höhenänderung von 9-10 cm. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass in Abhängigkeit von einer schwachen, azimutal ungleichmäßigen Konstellation und den Antennen auch noch ein geringer Lageanteil zu erwarten ist. Theoretische Untersuchungen für Basislängen  $\leq 100$  km sagen voraus, dass bei schlechter Konstellation Korrelationen zu den horizontalen Koordinatenkomponenten entstehen bzw. anwachsen (*Santerre 1991*).

Die Ergebnisse belegen die korrekten absoluten PCV und die Notwendigkeit ihrer Nutzung u.a. in großen Netzen. Somit kann eine Ecke des „Bermuda-Vierecks“ der korrelierten GPS-Parameter

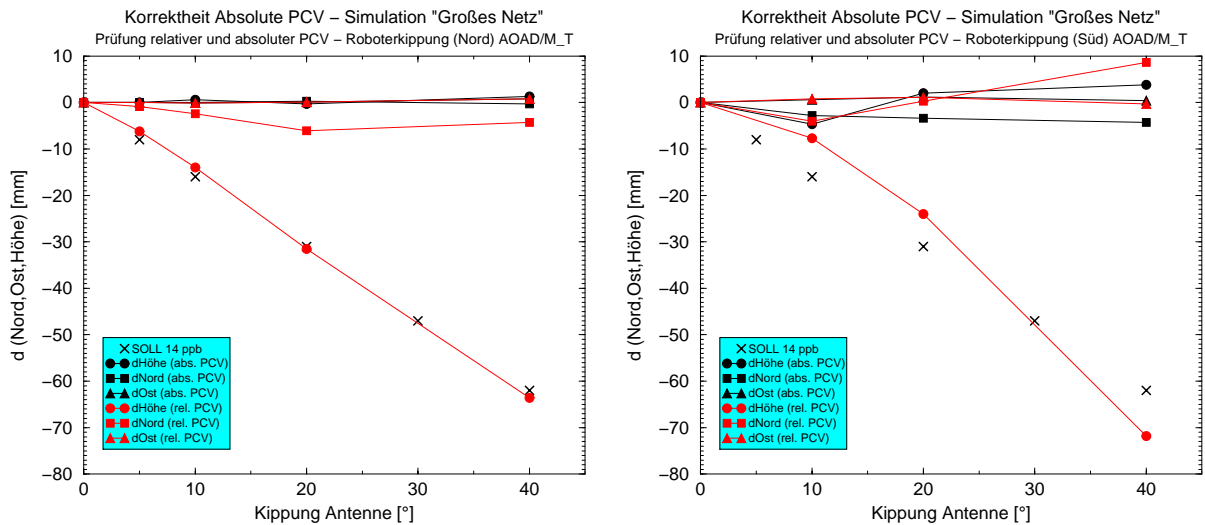


Abbildung 8.16: Simulation globaler Netzausdehnung durch Antennenkipplung auf Roboter. Kippung AOAD/M\_T um  $L_0$ -Offset bis  $40^\circ$ . Nach Norden (links), nach Süden (rechts). Auswertung  $L_0$  und Schätzung Troposphärenparameter.

eindeutig aufgelöst werden. Der verbleibende unmodellierter systematischer Effekt kann nur im Bereich der Satellitenantenne liegen, deren Auswirkung auch in zurückliegenden Untersuchungen anderer Gruppen bereits gezeigt wurde (*Springer 1999*). Interessant ist die Größenordnung der Ergebnisse, die bereits von *Beutler u.a. (1988)* für die Auswirkung eines absoluten Troposphärenfehlers abgeschätzt wurde. Dort wurde gezeigt, dass ein absoluter Troposphärenfehler zu einem Maßstabsfehler in den Relativkoordinaten von ungefähr 0.01 ppm je 2 cm Restfehler führt. Dies deutet für die oben beschriebenen Untersuchungen auf verbleibende nicht berücksichtigte Phasenzentrumsvariationen am Satelliten hin, die wiederum bei der Schätzung von Troposphärenparametern mismodelliert werden. Andererseits ist es somit Zufall, dass die GPS-Lösungen mit der augenblicklichen Kombination von relativen PCV und den festgelegten Satelliten-Offsets im IGS den gleichen Netzmaßstab wie SLR und VLBI aufweisen (s.u.).

Der Unterschied zwischen Massenmittelpunkt und aktuellem Phasenzentrum der verschiedenen Satelliten ist nicht genau bekannt. Die Satellitenantenne ist relativ komplex aufgebaut (Kapitel 4), was auf ein ebenso komplexes Sende- bzw. Empfangsverhalten schließen lässt. Bekannte Werte für ein mittleres Phasenzentrum ( $L_0$ ?) sind vermutlich aus Nahfeldmessungen in Kammern oder rein mathematischen Berechnungen des Sende- bzw. Empfangsverhaltens entstanden, ohne dass Einzelheiten bekannt sind. Generell werden die Variationen vernachlässigt und zu Null gesetzt. Spätestens der erste Start eines Block IIR Satelliten zeigte, dass bereits bei den Offsets Unsicherheiten bestehen. Erste Versuche der Schätzung eines neuen Wertes für den gesuchten Offset aus Beobachtungsdaten ergaben Widersprüche zu dem für ältere Satellitentypen angenommenen Wert und zeigten zudem die Schwierigkeiten ihrer Bestimmung aus GPS-Daten selbst (*Bar-Sever 1997, Bar-Sever 1998*). Eine Übersicht über die Entwicklungen der Satelliten-Offset-Festlegungen innerhalb des IGS und des GPS-Kontrollsegmentes wird im Rahmen eines GPS-Zeitbestimmungsprojektes (*Ray 2002*) dokumentiert (Tabelle 8.10). Für die präzise Zeitbestimmung ist eine einheitliche Regelung für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von erheblicher Bedeutung, sodass entsprechende Festlegungen getroffen wurden.

Überlegungen des IVS (*International VLBI Service*) zeigen, dass eine Ausmessung der GPS-

Tabelle 8.10: Festlegungen für die Radialkomponente  $dz$  der Offsets ( $L_0$ ) der Satellitenphasenzentren. Vektor Massenzentrum zum mittleren Phasenzentrum. Festes Satellitenkoordinatensystem mit  $dz$  in ständiger Ausrichtung zum Erdmittelpunkt.

Satellit	IGS [m]	OCS [m]	Mader [m]
Block I	0.854		
Block II	1.023	0.9519	
Block IIA	1.023	0.9519	( $L_1:1.18, L_2:0.87$ ) 1.66
Block IIR	0.000	1.1725	
Block IIR (OCS, bis 01.02.2001, 21:00)			
- SVN43		1.17254	
- SVN46		1.51500	
- SVN51		1.61400	
- SVN44		1.51300	
- SVN41		0.86710	
Block IIR (OCS, ab 01.02.2001, 21:00)			
- SVN43		1.61400	
- SVN46		1.51406	
- SVN51		1.61400	
- SVN44		1.51312	
- SVN41		1.61366	
- SVN54		1.59229	

Satellitenantennen durch VLBI nicht erfolgreich sein kann (Corey 2001). Einen größeren Erfolg hingegen verspricht eine Bodenkalisierung. Diese wurde vom NGS (Mader und Czopek 2001) für eine Block IIA Satellitenantenne durchgeführt. Dabei wurde eine entsprechende Antenne so modifiziert, dass sie als Empfangsantenne am Boden genutzt werden konnte. Über die Einführung der absoluten PCV der AOAD/M\_T innerhalb einer Relativkalibrierung konnten absolute  $L_1$ -,  $L_2$ - und  $L_0$ -Offsets abgeleitet werden, die allerdings von den sonst angenommenen Werten differieren (Tabelle 8.10). Eine zuverlässige Bestimmung von PCV war hingegen auf Grund der wenigen vorhandenen Beobachtungen innerhalb der schmalen Strahlungskeule nicht möglich. Ob die Modifikation der Satellitenantenne Auswirkungen auf das Sende- bzw. Empfangsverhalten hat ist nicht bekannt. Eine Verifikation für weitere Satelliten gleichen Typs bzw. andere Satellitentypen steht noch aus. Die durchgeführten Messungen beinhalten zudem die Unsicherheiten, die auch für die reine Offset-Bestimmung einer normalen Empfangsantenne zutreffen (Abschnitt 5.1). So besteht vor allem eine starke Abhängigkeit von der Beobachtungsverteilung und speziell der Elevationsmaske. Im vorgenannten Experiment wurde - um überhaupt genügend Beobachtungen zu empfangen - eine Elevationsmaske von  $60^\circ$  und somit ein Öffnungswinkel der Antenne von  $\pm 30^\circ$  genutzt, was mehr als einer Verdopplung des Normalwertes entspricht (Abschnitt 4.3). Dies kann mit ein Grund für die Abweichungen zu anderen Werten sein, denn die Veränderung des schmalen Winkelausschnitts und somit der Beobachtungsverteilung wird zu einer anderen Krümmung einer Schmiegekeule und folglich zu anderen Offsets führen.

Zur Verifikation der oben beschriebenen Untersuchungen mit GEONAP wurden weitere Tests mit 24h-Daten mit der GPS-Software BERNESE (Hugentobler u.a. 2001b) durchgeführt, deren Eingangsbeobachtungsgrößen Doppelte Differenzen sind. Trotz der o.g. Unsicherheiten bzw. Mängel der reinen Offset-Bestimmung fand eine Ausweitung der Tests statt, indem zusätzlich ein geänderter Satelliten-Offset (NGS) eingeführt wurde, da in der BERNESE-Software eine entsprechende dynamische Bahnmodellierungskomponente enthalten ist. Zudem wurden gleichzeitig



die Auswirkungen auf die korrelierte Größe des Troposphärenparameters dargestellt. Das Testnetz aus 14 relativ gleichmäßig verteilten IGS-Stationen (ASC1, ALGO, ANKR, BAHR, CORD, HARB, KOUR, MADR, MATE, MATH, NVSK, REYK, WTZR, ZWEN) wurde mit präzisen Ephemeriden des IGS, der Schätzung der Erdrotationsparameter, einer Elevationsmaske von  $10^\circ$ , dem Troposphärenmodell und der Mapping-Funktion von Niell und der Schätzung von statischen Troposphärenparametern für 2h-Blöcke ausgewertet. Es wurde nur die Station WTZR festgehalten.

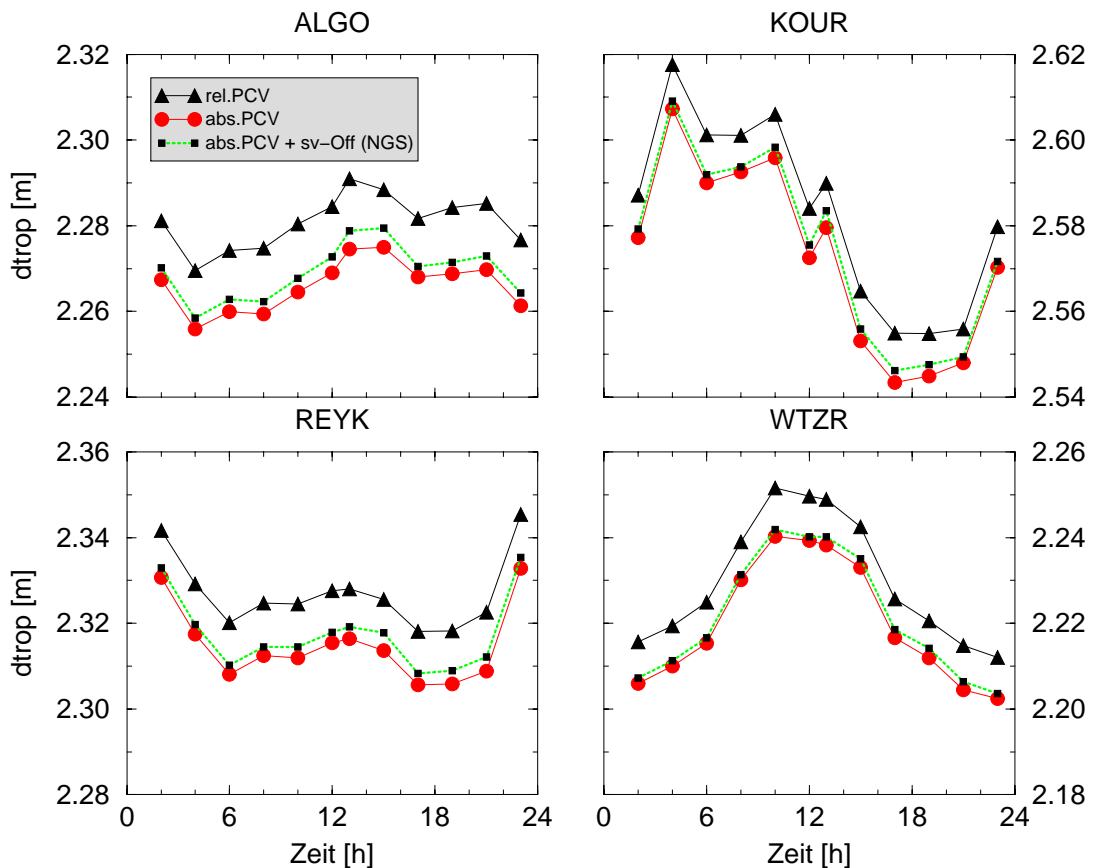


Abbildung 8.17: Verschiedene PCV-Modelle und Troposphärenmodellierung. Bernese-Auswertung globales Netz und Schätzung 2h-Troposphärenparameter. Beispiele für 4 Stationen. Veränderung der Zenitverzögerung in Abhängigkeit von den genutzten PCV-Modellen für Empfangs- und Satellitenantennen.

Die Veränderungen zwischen den Lösungen entsprechen den bereits dargestellten Ergebnissen der GEONAP-Auswertung. Werden absolute PCV eingeführt, so ergibt sich eine Differenz im Netzmaßstab zur Lösung mit relativen PCV von ca. 14 ppb. Die Strecken werden erwartungsgemäß länger, entsprechend einer globalen Höhenänderung um ca. 9 cm. Nach Einführung des vom NGS abgeleiteten Block IIA Satelliten-Offsets innerhalb der Auswertung mit absoluten PCV - hier für sämtliche Satelliten - verkleinert sich der Maßstab um ungefähr -5 ppb auf ca. 8 ppb. Die Effekte sind deutlich in den geschätzten troposphärischen Zenitverzögerungen zu erkennen (Abbildung 8.17), was die Wichtigkeit der PCV-Korrekturen für die Nutzung dieser Informationen unterstreicht. Diese werden nach Einführung absoluter PCV im Bereich von 1-2 cm kleiner

bestimmt, also in der Größenordnung der eingeführten PCV selbst. Die Zenitverzögerung muss entsprechend einer vergrößerten Höhenkomponente kleiner werden. Durch die Nutzung der veränderten Satelliten-Offsets wächst die Zenitverzögerung wieder in die andere Richtung. Diese Änderung ist allerdings erwartungsgemäß gering, da ein Großteil einer reinen Offsetänderung im Uhrfehler aufgeht. Vergleichbare Ergebnisse konnten in einem anderen Netz nachgewiesen werden (*Völksen und Menge 2002*). Es wird deutlich, dass die eingeführten Satelliten-Offsets eine Verbesserung der Modellbildung darstellt, aber weiterhin Restfehler (Satelliten-PCV) vorhanden sein müssen.

Neben einer aufwendigen Bodenkalibrierung einer einzelnen Satellitenantenne mit GPS wurden bereits früher Versuche zur Bestimmung der mittleren Phasenzentren der Satelliten aus den Daten globaler Netze unternommen (*Springer 2000a*). Es stellte sich heraus, dass auf Grund der Korrelation von troposphärischen Parametern und den PCV von Satelliten- und Empfangsantenne keine genaue Schätzung eines absoluten Offsets aus GPS-Daten durchgeführt werden kann. Ein weiteres Problem der Trennung der Parameter ist auch hier, dass der Satellit eine schmale Sendekeule mit einem Öffnungswinkel von ungefähr  $\pm 14^\circ$  aufweist. Die Wiederholungsgenauigkeit in den genannten Untersuchungen wurde im Bereich mehrerer Dezimeter angegeben. Die Schätzung der Offsets relativ zu einem fixierten Wert eines Satelliten hingegen ist mit Zentimetergenauigkeit möglich und ergab als wichtige Bestätigung, dass die Werte zwischen einzelnen Satelliten und verschiedenen Satellitentypen differieren. Dies unterstreicht, dass eine genaue Bodenkalibrierung der Offsets - und besser der gesamten PCV - für alle Satelliten durchgeführt werden muss. Die Untersuchungen von *Springer (2000a)* und *Zhu u.a. (2001)* zeigen zudem, dass der Netzmaßstab zur Gruppe der hoch korrelierten Parameter gehört. Dieser hat signifikanten Einfluss auf die Schätzung der Satelliten-Offsets. Dies ist verständlich, da im umgekehrten Fall (Einführung absoluter PCV, Änderung Satelliten-Offset) ein Netzmaßstab auftritt, der einer globalen Höhenänderung gleichgesetzt werden kann. Somit verbleibt das Problem, dass Schätzungen für das Phasenzentrum des Satelliten aus den Daten eines globalen Netzes nicht ohne Annahmen möglich sind.

Betrachtet man den Komplex der korrelierten Parameter und deren Trennung, so wird zu prüfen sein, ob die Bahnbestimmung hiervon beeinflusst ist. Untersuchungen zeigen eine Güte der Bahnen im Bereich einiger Zentimeter (*Hugentobler u.a. 2001a*), obwohl im gesamten Verfahrensablauf der GPS-Auswertung mit relativen PCV gearbeitet wird. Die Definition des Maßstabes über  $GM$  wird als so stark erachtet, dass Auswirkungen durch Veränderungen des PCV-Modells als gering abgeschätzt werden (*Springer 2000b*). Dies zeigen auch Auswertungen weiterer Gruppen (*Herring 2002*), bei denen besonders auf die Maßstabsproblematik hingewiesen wird. Nach *Springer (1999)* zeigen Vergleiche von mit SLR bestimmten Bahnen einiger mit Reflektoren ausgestatteter GPS-Satelliten zur GPS-Bahnlösung eine Streuung im Bereich von 5.5 cm. Dieses liegt durchaus im Genauigkeitsniveau der Bahnbestimmung selbst. Ein systematischer Offset von ca. 5 cm zwischen den beiden Ergebnissen weist allerdings auf nicht erfasste Effekte hin. Anteile sind dabei sicherlich in oben beschriebenen korrelierten Parametern zu suchen.

Es wird deutlich, dass eine reine Berücksichtigung der Offsets der Satellitenantennen nicht ausreichend für die Auflösung des Maßstabsproblems ist. Wie auch die Kalibrierungen der Empfangsantennen zeigen, sind die gesamten Phasenvariationen zu erfassen. Eine Bodenkalibrierung - wie vom NGS durchgeführt - auch der PCV der Satellitenantenne ist eine anzustrebende Verbesserung, da die bereits beschriebene Problematik des eingeführten Netzmaßstabes entfällt und keine der beschriebenen Abhängigkeiten bei reinen Offset-Bestimmungen auftreten. Dazu müssen jedoch mögliche Effekte durch das sog. Tuning der Antenne zum Empfang und die Schwierigkeiten des Signalempfangs außerhalb der Hauptstrahlungskeule beseitigt werden. Dabei ist ein

Verkippen der Antenne in ähnlicher aber wesentlich einfacherer Weise wie bei der Absoluten Feldkalibrierung mit Roboter eine prinzipielle Vorgehensweise, um innerhalb der  $14^\circ$ -Strahlungskeule eine bessere Beobachtungsabdeckung zu erhalten. Neben den Unsicherheiten und Anforderungen bezüglich der Messtechnik selbst ist die rein logistische Möglichkeit zum Kalibrieren von einer Großzahl verschiedener Satelliten(typen) allerdings schwer abschätzbar und eher unwahrscheinlich. So wird für eine praktische und wiederholbare Bestimmung der Satelliten-PCV sicherlich auf die GPS-Beobachtungsdaten zurückgegriffen werden müssen, falls sich auch keine weiteren Entwicklungen für präzise Kammerkalibrierungen der Satellitenantennen ergeben.

*Rothacher (1999)* zeigte, dass die PCV der Satelliten- und Empfangsantennen prinzipiell über die Beziehung

$$\sin(z') = \frac{R}{r} \cdot \sin(z) = \frac{R}{r} \cdot \cos(e) \quad (8.5)$$

ineinander überführt werden können. Dabei ist  $z'$  der Nadirwinkel am Satelliten,  $z$  der Zenitwinkel bzw.  $e$  der Elevationswinkel zum Satelliten an der Empfangsantenne,  $R$  der Erdradius und als Summe von Erdradius und Bahnhöhe des Satelliten der geozentrische Bahnradius  $r$ . Durch diese Abhängigkeit werden bei alleiniger Betrachtung von elevationsabhängigen Variationen die Satelliten-PCV im Bereich zwischen  $0$  und  $14^\circ$  auf die Empfänger-PCV im Bereich zwischen  $0$  und  $90^\circ$  und umgekehrt abgebildet. Aus (8.5) wird auch deutlich, dass eine sehr homogene Stationsverteilung über die gesamte Erde notwendig ist, um die vollständige Strahlungskeule eines Satelliten gleichmäßig zu erfassen. Ein Maximalwert für  $z'$  ist nur für Richtungen am Horizont der Empfangsantenne bei gleichzeitig möglichst kleinem Bahnradius  $r$  zu erreichen. Die Beziehung kann für die Ableitung der Satelliten-PCV aus globalen GPS-Daten genutzt werden. Phasenvariationen der Empfangsantenne (4.44) können so gleichermaßen als Variationen an der Satellitenantenne über

$$\Delta\varphi'_{ANT_f}(z') = \Delta\varphi_{ANT_f}(z), \quad (8.6)$$

beschrieben werden, wobei eine Änderung auf einer der Seiten die umgekehrte Phasenänderung auf der anderen bewirkt. *Rothacher und Schmid (2002)* schätzten bei Einführung der absoluten Empfänger-PCV aus der Roboterkalibrierung auf diese Weise elevationsabhängige Satelliten-PCV für Block II/IIA und davon differierende für Block IIR mit einer Wiederholungsgenauigkeit von etwa 1-2 mm. Auf diesem Weg kann eine Konsistenz bei der Nutzung absoluter PCV-Modelle hergestellt werden. Dabei tritt keine Maßstabsänderung bei Einführung absoluter PCV im Netz auf, sodass für reguläre und ständige Auswertungen wie im IGS eine Nutzung dieser Modelle möglich ist (*Rothacher und Mader 2002*).

Es verbleiben einige Nachteile. Dazu gehört, dass auf Grund der Verwendung von Daten aus einem globalen Netz nur PCV für die Linearkombination  $L_0$  und nicht für die beiden Originalfrequenzen abgeleitet werden können. Weiterhin ist die Beobachtungsverteilung über die gesamte Strahlungskeule wie beschrieben eher schwach. Zudem müssen andere Parameter bezüglich Bahn und Erdrotation parallel neu mitgeschätzt werden, da diese mit relativen PCV bestimmt werden

bzw. wurden. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor, wie bei der reinen Offset-Schätzung aus globalen GPS-Daten auch, ist die Korrelation mit dem Netzmaßstab. Es muss ein Koordinatensatz - als Ergebnis anderer Raumverfahren - für die GPS-Stationen weitgehend fixiert werden. Um die Problematik somit umgekehrt zu lösen, müssten die Satelliten-PCV vorher unabhängig bestimmt werden. In diesem Bereich wird weiterhin Forschungsarbeit nötig sein.

Die Ergebnisse sind nicht nur für bodengebundene Arbeiten von Bedeutung, sondern auch für Raummissionen. So sollen zentimetergenaue Bahnen aus Daten von GPS-Empfangssystemen an Bord von beispielsweise CHAMP, GOCE, GRACE u.a. abgeleitet werden. Für diese Anwendungen ist für höchste Genauigkeiten die Nutzung orientiert eingeführter absoluter PCV erforderlich, da die GPS-Empfangsantenne bzw. der ganze Satellit durch seine veränderte Position und Lage ständig Orientierungsänderungen gegenüber GPS-Satelliten und gegenüber dem globalen Referenznetz am Boden aufweist. Es wird deutlich, dass der durchgreifende Nachweis für Richtigkeit und Funktionalität des hochauflösenden absoluten Feldkalibrierungsverfahrens Entwicklungen initiiert und notwendig gemacht hat, die noch nicht abgeschlossen sind.

## Kapitel 9

# Zusammenfassung und Ausblick

In den letzten Jahren haben sich bezüglich Ausbau und Modernisierung von Konstellation und Signalstruktur vom GPS erhebliche Veränderungen gezeigt, die - besonders mit Blick auf kommende GNSS-Entwicklungen wie GALILEO - weitere Verbesserungen im Bereich der hochpräzisen Positionsbestimmung mit Phasenbeobachtungen erlauben. Die damit einhergehende Geräteentwicklung, die präzisere Modellierung einzelner Fehlerkomponenten und die Entwicklung neuer bzw. Erweiterung bestehender Auswertelgorithmen ermöglichen zunehmend genauere und zuverlässigere Ergebnisse. Dies gilt auch bei verkürzten Messzeiten oder größeren Stationsentfernungen. Für derartige Beobachtungsszenarien ist es wichtig, jegliche systematischen Fehler von vornherein bestmöglich zu korrigieren. Dazu gehören die Antennenfehler, die mit einer 1 mm-Genauigkeit benötigt werden.

Die Zusammenschau der komplexen elektrotechnischen Grundlagen im Bereich der Herstellung von Antennen zeigt die Vielfalt unterschiedlicher Modelle, Einflussfaktoren und Ziele für die Nutzung im genauen geodätischen Bereich. Von der Konstruktionsseite her werden mit erheblichem Forschungspotential die Parameter dieses Systems exakt aufeinander abgestimmt. Veränderungen der Art, der Form, der Größe, der Anzahl von Empfangselementen, der Speisung, der Grundplatte, einer Dome-Konstruktion u.a. wirken sich auf das Empfangs- bzw. Sendeverhalten aus. Dabei wird deutlich, dass sich vor allem die Wünsche nach möglichst rauscharmen Signalempfang bis zum Antennenhorizont bei gleichzeitiger Vermeidung des Empfangs von LHCP-Mehrwegesignalen teilweise widersprechen. Die Phasenzentrumsvariationen - letztlich als geometrisch interpretierbare falsche Streckenmessung mit direkter Verbindung zur Positionsbestimmung - können durch bestimmte Empfangselemente und Speisung zumindest für die Lagekomponenten sehr klein gehalten werden.

Die Antennen-PCV lassen sich geometrisch über ein mittleres Phasenzentrum und die auf Grund der Antennenkonstruktion unvermeidlich auftretenden Phasenvariationen als Abweichungen zu einem Kugelstrahler beschreiben. Als Konstruktionsanforderung für gute geodätische Antennen werden meist kleine PCV angestrebt. Bei hochwertigen Kalibrierungsergebnissen und deren Nutzung ist dies aber weniger wichtig als die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Korrekturen. Berechnungen der theoretischen Auswirkungen eines reinen PCV-Fehlers auf die Positionsgenauigkeit bei Kurzzeitmessungen - beispielsweise durch Nicht-Kalibrierung oder mangelnde PCV-Qualität - zeigen die hohen Anforderungen an eine Korrektur. Betrachtet man Rover- und Basisstationen innerhalb eines Referenznetzes und die Nutzung des ionosphärenfreien Signals  $L_0$ , so müssen die PCV mit bis zu 1 mm für eine Positionsgenauigkeit von 1 cm bekannt sein.

Die ersten operationellen Kalibrierungsmethoden betrachteten nur die Bestimmung eines mitt-

leren Phasenzentrums. Dies muss heute als eine Prüfung bzw. als Zwischenschritt einer Komplettkalibrierung betrachtet werden, denn die Offsets sind von vielen Einflussfaktoren abhängig. Abgesehen von der grundsätzlichen Möglichkeit der Bestimmung absoluter und relativer Offsets verändern vor allem verschiedene Satellitenkonstellationen, die Messumgebung und besonders die Wahl der Elevationsmaske die Ergebnisse. Hinzu kommen Unterschiede durch die gewählte Modellierung/Minimumsbedingung und zusätzliche Abhängigkeiten von der Topographie der PCV. Vergleiche auf identischem absoluten Bezugsniveau zeigen Differenzen verschiedener Methoden für den Höhenoffset von wenigen mm bis zu 2 cm. Dies alles ist unkritischer für weniger genaue Anwendungen und bei Nutzung von Offsets identischer Herkunft. Für hochpräzise Anwendungen müssen die verbleibenden Restfehler zum Offset zwingend mitmodelliert werden.

Die relative Feldkalibrierung bestimmt die PCV in Bezug auf eine Referenzantenne, i.d.R. die  $AOAD/M\_T$  als sog. IGS-Niveau mit festgelegten Offsets und zu Null gesetzten PCV. Die Methoden sind unkompliziert, weisen aber einige Beschränkungen auf. Sie sind nur für gleichorientierte Antennen gültig und somit nicht für Anwendungen mit verkippten Antennen und in großen Netzen. Es ergeben sich zudem Schwierigkeiten bei der Ableitung hochauflösender azimuthaler PCV und von PCV nahe dem Antennenhorizont. Je nach Methode können mehr oder weniger Stationsabhängigkeiten auftreten. Eine vollkommen andere Möglichkeit ist die Kammerkalibrierung aus dem Bereich der Elektrotechnik. Das Verfahren ist weniger operationell und für die Kalibrierung großer Mengen von Antennen kaum geeignet. Auch hier können Restfehler durch verbleibende Mehrwegeeffekte, durch mechanische Ungenauigkeiten u.a. auftreten.

Die Nachteile bestehender Verfahren waren Ansatzpunkt für die Entwicklung der Absoluten Feldkalibrierung. Ziel war dabei die Trennung der PCV von anderen stationsabhängigen Fehlern. Dieses gelingt durch spezielle Modellierungsansätze innerhalb undifferenzierter GPS-Software, durch eine besondere Beobachtungsanordnung und die Nutzung einer besonderen Mechanik zur Drehung und Kippung der Antennen in einem Punkt. Anfänglich wurden im Post-Processing Tagesdifferenzen zur Beseitigung von Mehrwegeeffekten genutzt. Der hohe manuelle Aufwand und Unsicherheiten der Kippvorrichtung führten zur automatisierten Kalibrierung mit einem Roboterarm in Echtzeit. Die Trennung der PCV vom Multipath gelingt durch schnelle Orientierungsänderungen der Antenne. Das entwickelte Kalibrierungsmodell für den Roboterarm selbst erlaubt die Orientierungsänderung der zu kalibrierenden Antenne in einem Punkt mit einer Genauigkeit von 0.2-0.3 mm.

Umfangreiche Untersuchungen der Genauigkeit dieses Verfahrens bestätigen die weitgehende Unabhängigkeit von Umgebungseinflüssen und die hohe Auflösung der Ergebnisse. Vergleiche mit Kalibrierungsergebnissen aus dem Post-Processing-Verfahren belegen, dass vor allem die besonders gute Beobachtungsüberdeckung der entscheidende Schritt zu hochauflösenden PCV ist. Die äußere Genauigkeit, abgeleitet aus Wiederholungskalibrierungen, liegt im Mittel im Niveau von 0.5 mm. Nur partiell ergeben sich in Horizontnähe Einzelabweichungen zwischen Kalibrierungen bis zu 1 mm und teilweise mehr. Die Unabhängigkeit der Ergebnisse wird anhand diverser Tests unter einer Vielzahl veränderter Rahmenbedingungen nachgewiesen.

Für PCV-Vergleiche verschiedener Methoden bzw. ihrer gleichzeitigen Nutzung müssen diese ineinander überführt werden. Dies kann mathematisch streng erfolgen. Eine Möglichkeit ist die sog. Nullantenne. Diese beschreibt auf absolutem Niveau - im Rahmen der Realisierungsgenauigkeit - eine Antenne ohne PCV. Auf relativem Bezugsniveau repräsentiert sie die verbleibenden absoluten PCV der  $AOAD/M\_T$  bezüglich des IGS-Referenz-Offsets. Die Umrechnungsverfahren bergen jedoch Unsicherheiten und Genauigkeitsverluste durch Vernachlässigung azimuthaler PCV und von Lage-Offsets bei der Umrechnung rein elevationsabhängiger PCV, durch inkonsistente Bestimmungsmethoden der Offsets, durch die Realisierung der Referenzantenne und durch ver-

bleibende Systematiken in den Kalibrierungen selbst. Einheitliche PCV-Korrekturen aus einem Verfahren sind für höchste Ansprüche vorzuziehen.

Durchgeführte Vergleichsuntersuchungen betreffend Auflösung und Genauigkeit der Verfahren bestätigen die Vorteile der Absoluten Feldkalibrierung mit Roboter. Es zeigt sich, dass Konstellationseffekte und Mehrwegeeffekte Fehler in der Relativkalibrierung verursachen können. Die Ableitung von PCV-Korrekturen unterhalb  $10^\circ$  Elevation und von azimuthalen PCV ist eingeschränkt. Die Differenzen zwischen (Voll-)modellen der Relativ- und der Absolutkalibrierung weisen Systematiken auf, die sich bei Mischung der Modelle im Positionsraum mit bis zu 1 cm und mehr auf die Höhe auswirken können ( $L_0$ -Signal, Troposphärenparameter). Teilweise sind Lagedifferenzen zu erkennen. Als Auslöser sind vor allem die Resteffekte durch Multipath anzunehmen. Grundsätzlich harmonisieren die auf ein Niveau umgerechneten PCV, wobei sich jedoch für hochpräzise Anwendungen die Güte der Roboterkalibrierung klar zeigt. Der Vergleich mit - nur elevationsabhängigen - Absolutergebnissen aus Kammermessungen liegt auf ähnlichem Niveau. Wichtigste Erkenntnis dabei ist die grundsätzliche Kompatibilität zur Absoluten Feldkalibrierung trotz grundverschiedener Vorgehensweise.

Diverse exemplarische Untersuchungen verschiedener Antennen(typen) verdeutlichen die Größenordnung der auftretenden PCV und der möglichen Effekte durch äußere Einflüsse. Kleine Rover-Antennen mit runder Grundplatte weisen oft sehr kleine PCV auf, wodurch sie der Nullantenne nahe sind. Andererseits zeigt sich, dass diese Antennen im Vergleich mit Referenzstationsantennen meist eine schlechtere Wiederholbarkeit der Kalibrierungen aufweisen. Bei asymmetrischen Gehäuse- und Grundplattenformen treten klare azimuthale Variationen auf. Die Unterschiede zwischen Minima und Maxima können in Horizontnähe selbst für die Grundsignale 1 cm weit überschreiten. Die Nutzung einer großen runden Grundplatte verändert die PCV stark und es verbleiben fast nur noch elevationsabhängige PCV mit starken Gradienten.

In den Untersuchungen unterschiedlicher Dome-Konstruktionen treten durch die symmetrischen Formen meist rein elevationsabhängige Effekte im Bereich von  $\pm 1-2$  mm für die Grundsignale auf. Der SCIS-Dome zeigt speziell im hohen Elevationsbereich einen starken Gradienten, was auf deutliche Auswirkungen im Positionsraum schließen lässt. Dome-Konstruktionen mit separaten Grundplatten (Trimble TCWD) zeigen die stärksten Effekte mit über 2 cm für das  $L_0$ -Signal.

Mit der Roboterkalibrierung sind signifikante Differenzen zwischen Individual- und Typkalibrierungen nachweisbar. Teilweise sind sogar Unterschiede innerhalb einer Baureihe bei Referenzstationsmodellen erkennbar, die bei der Nutzung des  $L_0$ -Signals für genaueste Anwendungen nicht vernachlässigt werden können. So sollte für diesen Bereich, beispielsweise für Referenzstationsbetreiber, eine Individualkalibrierung vorgezogen werden.

Die Auswirkungen der auftretenden PCV in der Positionsbestimmung sind unterschiedlicher Natur und abhängig von den eingesetzten Antennen, der Art und Qualität der Korrektur, der Netzgröße und -konfiguration und der Art der Anwendung und Auswertung. Anhand beispielhafter Beobachtungs- und Auswerteszenarien, realen Messungen und Simulationen, wurden die Positionseffekte aufbereitet. In lokalen Netzen sind die Unterschiede zwischen verschiedenen Korrekturmodellen prinzipiell geringer einzuschätzen, da i.d.R. keine Verstärkungen der Effekte durch Schätzung von Troposphärenparametern und Nutzung des  $L_0$ -Signals auftreten. Besonders für die Höhenkomponente lassen sich dennoch die Vorteile hochauflösender PCV herausarbeiten.

Aus Vergleichen mit SOLL-Nivellementshöhen sind die Ergebnisse lokaler Langzeitbeobachtungen für rein elevationsabhängige relative PCV und einem absoluten Vollmodell auf Millimeter-Niveau als gleich anzusehen. Die reine Offset-Korrektur fällt in der Übereinstimmung etwas ab. Bei Kurzzeitmessungen, speziell für Antennen mit starken Variationen, zeigen sich deutlich die

Unterschiede zwischen den Kalibrierungsmethoden, wobei sich innerhalb der Absolutkalibrierung wie erwartet das Vollmodell als beste Korrektur erweist. Dies ist auch in Untersuchungen mit verkippten Antennen nachweislich der Fall. Hier wird zudem der Nachweis für die Notwendigkeit absoluter PCV für derartige Anwendungen geführt.

Die Experimente hinsichtlich der Auswertung regionaler und globaler Beobachtungen dienen vor allem der Verifikation der Effekte verschiedener PCV-Modelle im Zusammenhang mit der Troposphärenmodellierung, mit einer schnellen Mehrdeutigkeitslösung und mit der grundsätzlichen Problematik absoluter PCV im globalen Netz. Versuche mit Schätzung von Troposphärenparametern auf kurzer bekannter Referenzbasis zeigen die kleinsten Differenzen bei Nutzung des hochauflösenden Modells und die erwarteten Effekte von bis zu mehreren Zentimetern bei einer reinen Offset-Korrektur. Weiterhin zeigt sich in diesem Test die bessere Dekorrelation zwischen Höhenkomponente und Troposphärenparametern bei kleinerer Elevationsmaske. Untersuchungen der Mehrdeutigkeitslösung einer Echtzeitvernetzung im regionalen Netz und der Positionsbestimmung für verschiedene Rover unterstreichen, dass ein hochauflösendes absolutes PCV-Modell Vorteile in der Initialisierungszeit gegenüber einem rein elevationsabhängigen Relativmodell in der Größenordnung von 25% ergeben kann.

Anhand globaler Messdaten kann - hier am Beispiel SCIS-Dome - gezeigt werden, dass die Vernachlässigungswirkung identischer PCV geographisch gesehen nicht gleich ist. In Abhängigkeit von Stationsbreite und den PCV ergeben sich unterschiedliche Effekte im Positionsraum. Werden absolute PCV in einem globalen Netz eingeführt, so ergibt sich ein Maßstabeffekt des Netzes im Bereich von 14-15 ppb, was einer globalen Höhenänderung der Stationen um ungefähr 9-10 cm entspricht. Über eine Zero-Baseline-Simulation bestätigt sich die Größenordnung. Zudem wirkt sich der Effekt erwartungsgemäß im Zentimeterbereich auf die Schätzung von Troposphärenparametern aus. Ursache ist die Vernachlässigung des Absolutanteils der  $AOAD/M\_T$  bezüglich des IGS-Referenz-Offsets bei der Relativkorrektur. Im globalen Netz werden die unterschiedliche Ausrichtung der Antennen und die unterschiedlichen Richtungen gleichzeitig empfangener Satellitensignale nur durch absolute PCV richtig korrigiert.

Anfänglich traten Zweifel innerhalb der GPS-Gemeinschaft an der Korrektheit absoluter Korrekturen auf, da der Netzmaßstab aus unabhängigen Raumverfahren und aus mit relativen PCV berechneten GPS-Auswertungen homogen scheinen. Dies ist zufällig, da absolute Kammer- und Feldmessungen ebenso wie absolute und relative PCV zueinander passen bzw. überführbar sind. Weiterhin wird durch eine Simulation mit verkippter Antenne ein durchgreifender Beweis für die Korrektheit absoluter PCV und deren zwingende Nutzung für Anwendungen mit gegeneinander verkippten Antennen gezeigt.

Der Einfluss absoluter PCV auf ein Netz kann somit nur in anderen systematischen Fehlern begründet sein. Das unzulänglich modellierte Sendeverhalten der Satellitenantennen ist Auslöser hierfür. Untersuchungen aus globalen Daten und aus Bodenkalibrierungen anderer Gruppen ergeben unterschiedliche Werte für die Satelliten-Offsets, zeigen aber auch die Schwierigkeit ihrer Bestimmung. Die Nutzung neuer Offset-Werte in globalen Berechnungen führt zu einer Minderung des Maßstabsproblems. Eine Beseitigung wird allerdings nur über die Bestimmung der verbleibenden PCV möglich sein, bei deren Bestimmung aus globalen Beobachtungsdaten aber wiederum Abhängigkeiten zum eingeführten Netzmaßstab bestehen.

Die Entwicklung des absoluten Feldkalibrierungsverfahrens ist ein entscheidender Schritt zur Aufschlüsselung des sog. „Bermuda-Vierecks“, der Korrelation zwischen Höhenkomponente, Troposphärenmodellierung und Phasenzentrumsvariationen der Sende- und Empfangsantennen. Die hochauflösenden PCV aus der Roboterkalibrierung liefern einen wichtigen Beitrag zur Dekorrelation dieser Parameter. Sie liefern bis zum Antennenhorizont eine präzise, stationsunabhän-



---

gige und für jede Anwendungssituation gültige Korrektur. Ausgehend von diesem Stand besteht erheblicher weiterer Forschungsbedarf auf dem Gebiet der hochpräzisen Nutzung der GPS-Phaseninformation.

Als nächster Schritt werden absolute PCV auch in globalen Netzen zugelassen, wobei das Problem der Satelliten-PCV gelöst bzw. eine Abstimmung auf die PCV der Empfangsantennen durchgeführt werden muss (*Rothacher und Schmid 2002*). Zukünftig müssen Kalibrierungen auch für andere Systeme wie GALILEO durchgeführt werden, wobei die PCV für einen kleinen Frequenzbereich einer Antenne sicherlich als identisch eingeschätzt werden können. Dies zeigen Tests der Roboterkalibrierung für die GLONASS-Signale, die allerdings auf Grund der eingeschränkten Konstellation nicht als operationell angesehen werden können.

Zur Zeit sind die absoluten PCV noch mit einer Unbekannten behaftet. Ihre Topographie wird exakt bestimmt und die absolute Lagerung über Bedingungen festgelegt, wobei der Effekt im Uhrfehler untergeht. Um zukünftig tatsächlich absolute PCV bestimmen zu können, müssen mehrere Parameter im System Antenne-Empfänger voneinander getrennt werden. Eine Trennung von Uhrfehler und Laufzeitverzögerungen im Empfänger würde erst wirklich eine präzise absolute Ionosphären-, Troposphären- und auch Zeitbestimmung aus GPS-Phasenbeobachtungen ermöglichen (*Wübbena und Schmitz 2002*).

Für die hochgenaue Positionsbestimmung, vor allem bei Kurzzeitbeobachtungen, aber ebenso für die präzise Zeitübertragung und die Troposphärenmodellierung ist eine hohe Auflösung der stationsabhängigen Fehler von Bedeutung. Dazu gehören somit auch Mehrwegeeffekte. Ebenso können die kritischen korrelierten Parameter im sog. „Bermuda-Vierecks“ durchaus noch um diesen Anteil erweitert werden. Für den Mehrwegeeinfluss auf Trägerphasen besteht ein hoher Bedarf an präziser Information. Es werden bereits verschiedene Ansätze wie u.a. die Verwendung von Antennen-Arrays (Abschnitt 3.2.2) untersucht. Vor allem bei der Nutzung des Signal-Rausch-Verhältnisses sind auf Grund vielfacher Einflussparameter noch Entwicklungen für eine normierte Nutzung erforderlich. In diversen Algorithmen müssen oft a-priori Annahmen für die Modellierung getroffen werden. Viele Verfahren sind noch wenig operationell. Ein vielversprechendes Modell ist die Weiterentwicklung des Hannoverschen Verfahrens der Absoluten Feldkalibrierung mit Roboter (*Böder 2002*), welches auf die stationsunabhängigen PCV aufsetzend die restlichen Stationseffekte kalibriert.

# Literaturverzeichnis

**AdV (2002):** *AdV Plenum - 110. Tagung*. Saarbrücken, 25.-26. April 2002.

**Aparicio, M., P. Brodie, L. Doyle, J. Rajan, P. Torrione (1996):** GPS Satellite and Payload. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 209-244.

**ASFC (1997):** *Capstone Requirements Document For Global Position, Velocity, And Time Determination Capability*. DRAFT, Air Force Space Command (AFSC), 18. Juli 1997.

**ARINC (1991):** *NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interface Control Document, ICD-GPS-200*. ARINC Research Corp., Fountain Valley, CA, USA, 1991.

**Augath, W. (2001):** Europäische Entwicklungen und ihr Bezug zu Radionavigationsplänen. In: *GPS-Trends und Realtime-Anwendungen*, DVW Schriftenreihe 41/2001, 36-46.

**Bauersima, I. (1983):** *Navstar/Global Positioning System (GPS)(II)*. Mitteilung Nr. 10, Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald, Druckerei Universität Bern 1983.

**Bauregger, F.N., T. Walter, P. Enge (2001):** The Dielectric Cavity Antenna - An Alternative to the Choke Ring Antenna. *Proceedings of the National Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Long Beach, California, USA, January 22-24, 2001.

**Benedicto, J., S. Dinwiddy, G. Gatti, R. Lucas, M. Lugert (2000):** ESA's Proposal GalileoSat. *Galileo's World*, Autumn 2000, 28-37.

**Balanis, C.A. (1997):** *Antenna Theory: Analysis and Design*. 2nd Edition, Verlag John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.

**Bar-Sever, Y. (1997):** *Information regarding Block IIR Modeling*, IGS Electronic Mail, Message Number 1653, July 1997.

**Bar-Sever, Y. (1998):** *New estimated value for GPS43 antenna phase center offset*, IGS Electronic Mail, Message Number 1900, May 1998.

**Bar-Sever, Y., P. Kroger, J. Borjesson (1998):** Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with single GPS receiver. *Journal of Geophysical Research*, Vol 103, Nr. B3, 1998, 5019-5035.

**Bartels, G.A. (1995):** *GPS-Antenna phase center measurements performed in an anechoic chamber*. Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Report LR-791, Delft, May 1995.

- Becker, D. (1994):** Mehrwegeeinfluß bei GPS. *SPN - Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation*, Heft 4/94, 122-127.
- Beutler, G., W. Gurtner, I. Bauersima, M. Rothacher (1987):** Correlations between simultaneous GPS double difference carrier phase observations in the multistation mode: Implementation considerations and first experiences. *Manuscripta Geodaetica*, Nr. 12, 40-44.
- Beutler, G., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht, A. Geiger (1988):** Atmospheric Refraction and Other Important Biases in GPS Carrier Phase Observations. In: Brunner, F.K. (Hrsg.): *Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements*. Monograph 12, School of Surveying, University of New South Wales, 15-43.
- Beutler, G. (1998):** The Role of GPS in Space Geodesy. In: Teunissen, P.J.G., A. Kleusberg (Hrsg.): *GPS for Geodesy*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1998, 625-650.
- Beutler, G., R. Weber, U. Hugentobler, M. Rothacher, A. Verdun (1998):** GPS Satellite Orbits. In: Teunissen, P.J.G., A. Kleusberg (Hrsg.): *GPS for Geodesy*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1998, 43-109.
- Bevis, M., S. Businger, T.A. Herring, C. Rocken, R.A. Anthes, R.H. Ware (1992):** GPS meteorology remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research*, Vol 97, Nr. D14, 1995, 15787-15801.
- Bishop, G.J., J.A. Klobuchar, P.H. Doherty (1985):** Multipath effects on the determination of absolute ionospheric delay from GPS signals. *Radio Science*, Vol 20, Nr. 3, 1985, 388-396.
- Blomenhofer, H. (1996):** *Untersuchungen zu hochpräzisen kinematischen DGPS-Echtzeitverfahren mit besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Fehlereinflüsse*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 51, Neubiberg 1996.
- BMVBW (1999):** *Deutscher Funknavigationsplan DFNP*. Schlussbericht Forschungsvorhaben Nr. 96552/98 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW), Stand 1999.
- Bock, Y. (1998):** Reference Systems. In: Teunissen, P.J.G., A. Kleusberg (Hrsg.): *GPS for Geodesy*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1998, 1-41.
- Böder, V., F. Menge, G. Seeber, G. Wübbena, M. Schmitz (2001):** How to Deal With Station Dependent Errors - New Developments of the Absolute Field Calibration of PCV and Phase-Multipath With a Precise Robot. *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2001, Salt Lake City, Utah, USA, September 11-14, 2001, 2166-2176.
- Böder, V. (2002):** *Zur hochgenauen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 245, Hannover 2002.
- Braasch, M.S. (1996):** Multipath Effects. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 547-568.

- Breuer, B., J. Campbell, A. Müller (1993):** GPS-Meß- und Auswerteverfahren unter operationellen GPS-Bedingungen. *SPN - Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation*, Heft 3/93, 82-90.
- Breuer, B., J. Campbell, B. Görres, J. Hawig, R. Wohlleben (1995):** Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen. *SPN - Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation*, Heft 2/95, 49-59.
- Brown, A. (2001):** High Accuracy GPS Performance using a Digital Adaptive Antenna Array. *Proceedings of ION National Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Long Beach, California, USA, January 22-24, 2001.
- Brown, R.G., P.Y.C. Hwang (1992):** *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. 2nd Edition, Verlag John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.
- Brunner, F.K., H. Hartinger, L. Troyer (1999):** GPS Signal Diffraction Modelling: the Stochastic SIGMA- $\Delta$  Model. *Journal of Geodesy*, JoG 73(1999), 259-267.
- Campbell, J. (1996):** Empfängertechnologien und Antennenfragen. *Vermessungspraxis mit GPS*, VDV-Schriftenreihe, Band 13, Verlag Chemielorz GmbH, Wiesbaden 1996, 49-60.
- Campbell, J., B. Görres, H. Kotthoff, R. Wohlleben (1999):** Definition von Antennenphasenzentren und Signifikanz der Ergebnisse aus Kammer- und Feldverfahren, Teil 1: Definition und Laborverfahren. In: Campbell, J., B. Görres (Hrsg.): *Proceedings Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen*, Geodätisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 28. April 1999.
- Carr, J.J. (1998):** *Practical Antenna Handbook*. 3rd Edition, Verlag McGraw-Hill, Inc., New York, 1998.
- Comp, C.J., P. Axelrad (1996):** An Adaptive SNR-Based Carrier Phase Multipath Mitigation Technique. *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-1996, Kansas City, Missouri, USA, September 17-20, 1996, 683-697.
- Corey, B. (2001):** *URSI presentation on GPS phase center WG*, IVS TD Mail Message 00026, January 2001.
- Daly, P., P.N. Misra (1996):** GPS and Global Navigation Satellite System (GLONASS). In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 2, 243-272.
- Davies, K. (1990):** *Ionospheric Radio*. IEE Electromagnetic Waves Series 31, Verlag Peter Peregrinus Ltd., London, 1990.
- Davis, J., G. Elgered, A. Niell, C. Kuehn (1993):** Ground-based measurements of the gradients in the wet radio refractivity of air. *Radio Science*, Vol 28, Nr. 6, 1993, 1003-1019.
- Dietrich, R., R. Dach, G. Engelhardt, J. Ihde, W. Korth, H.-J. Kutterer, K. Lindner, M. Mayer, F. Menge, H. Miller, C. Müller, W. Niemeier, J. Perlt, M. Pohl, H. Salbach, H.-W. Schenke, T. Schöne, G. Seeber, A. Veit, C. Völksen (2001):** ITRF coordinates and plate velocities from repeated GPS campaigns in Antarctica - an analysis based on different individual solutions. *Journal of Geodesy*, JoG 74(2001) 11/12, 756-766.

- DIN/NABau (2003):** *DIN 18 727 - Kalibrierung von GNSS-Antennen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Normenausschuss Bauwesen (NABau), NABau-Arbeitsausschuss 03.04.00 "Geodätische Instrumente und Geräte", Manuskript Fassung Februar 2003.
- DoD (1995):** *Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification*. U.S. Department of Defense, Washington, D.C., 2. Auflage, 2. Juni 1995.
- DoD (2001):** *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*. U.S. Department of Defense, Assistant Secretary of Defense, Washington, D.C., 4. Oktober 2001.
- DoD, DoT (1997):** *1996 Federal Radionavigation Plan FRP*. Department of Defence and Department of Transportation, DOT-VNTSC-RSPA-97-2/DOD-4650.5, National Technical Information Service, Springfield, Virginia.
- Eisfeller, B. (1997):** *Ein dynamisches Fehlermodell für GPS Autokorrelationsempfänger*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 55, Neubiberg 1997.
- Eisfeller, B. (2002):** Das Europäische Satellitennavigationssystem GALILEO. In: Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (Hrsg.): *Vorträge des 4. SAPOS-Symposiums*, Hannover, 21.-23. Mai 2002.
- Eisfeller, B., G.W. Hein, J. Winkel, P. Hartl (2000):** Requirements on the Galileo Signal Structure. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2000, Salt Lake City, Utah, USA, September 19-22, 2000, 1772-1781.
- Elosegui, P., J.L. Davis, R.T.K. Jaldehag, J.M. Johansson, A.E. Niell, I.I. Shapiro (1995):** Geodesy using the Global Positioning System: The effects of signal scattering on estimates of site position. *Journal of Geophysical Research*, Vol 100, Nr. B7, 1995, 9921-9934.
- Elrod, B.D., A.J. van Dierendonck (1996):** Pseudolites. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 2, 51-79.
- Euler, H.J. (2002):** Standardkonforme Verwendung von Antennenkalibrationen mit vernetzten Referenzstationen. In: Campbell, J., G. Seeber (Hrsg.): *Proceedings 4. GPS-Antennenworkshop 2002*, Hannover, 21. Mai 2002.
- Feldmann-Wetsendorff, U., B. Sorge (2002):** Vergleichstest von Kalibrierverfahren Für GPS-Antennen. In: Campbell, J., G. Seeber (Hrsg.): *Proceedings 4. GPS-Antennenworkshop 2002*, Hannover, 21. Mai 2002.
- Filippov, V., D. Tatarnikov, J. Ashjaee, A. Astakhov, I. Sutiagin (1998):** The First Dual-Depth Dual-Frequency Choke Ring. *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-98, Nashville, Tennessee, USA, September 15-18, 1998, 1035-1040.
- Fontana, R.D., W. Cheung, P.M. Novak, T.A. Stansell (2001):** The New L2 Civil Signal. *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2001, Salt Lake City, Utah, USA, September 11-14, 2001, 617-631.

- Garin, L., J. Rousseau (1997):** Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code & Carrier. *Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-1997, Kansas City, Missouri, USA, September 16-19, 1997, 559-568.
- Geiger, A. (1988):** *Einfluss und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilungen Nr. 43, Zürich, September 1988.
- Gendt, G., G. Dick, S. Göbell, M. Ramatschi, C. Reigber, M. Tomassini (2002):** Nutzung von SAPOS-Referenzstationen zur Wettervorhersage und Klimaforschung. In: Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (Hrsg.): *Vorträge des 4. SAPOS-Symposiums*, Hannover, 21.-23. Mai 2002.
- Georgiadou, Y., A. Kleusberg (1988):** On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning. *Manuscripta Geodaetica*, Nr. 13, 172-179.
- Ghassemi, K., S. Fisher (1998):** Performance Projections of GPS IIF. *Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-97, Kansas City, Missouri, USA, September 16-19, 1997, 407-416.
- Goad, C. (1985):** Precise Relative Position Determination Using Global Positioning System Carrier Phase Measurements in a Nondifferenced Mode. *Proceedings the First International Symposium on Precise Positioning with GPS*, Rockville, MD, USA, April 15-19, 1985, 347-356.
- Görres, B., J. Campbell (2000):** Absolut- und Relativkalibrierung von GPS-Antennen: Definition und Ergebnisse. In: Seeber, G., F. Menge, V. Böder (Hrsg.): *Proceedings GPS-Antennenworkshop 2000*, Hannover, 10. Mai 2000.
- Görres, B. (2001):** Zur Kalibrierung von GPS-Antennen. In: *Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik*, DVW Schriftenreihe 42/2001, 206-221.
- Görres, B., J. Campbell (2001):** Zur Verwendung der Kalibrierdaten von GPS-Antennen in der Praxis. In: Campbell, J., B. Görres (Hrsg.): *Proceedings 3. GPS-Antennen-Workshop 2001*, Geodätisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 11. Mai 2001.
- GPS World (2001):** GPS World Antenna Survey. *GPS World*, February 2001, 38-47.
- GPS World (2003):** GPS World Antenna Survey. *GPS World*, February 2003, 36-44.
- Grant, D.B., C. Rizos, A. Stolz (1985):** Dealing with GPS biases: Some Theoretical and Software Considerations. *Contributions to GPS Studies, UNISURV S-38*, Reports from School of Surveying, University of New South Wales, Kensington, Australia.
- Gurtner, W. (2002):** *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10*. Astronomisches Institut, Universität Bern, 25. Januar 2002.
- Han, S., C. Rizos (1997):** Comparing GPS Ambiguity Resolution Techniques. *GPS World*, October 1997, 54-61.
- Hankemeier, P. (2000):** SAPOS - eine geodätische Infrastruktur in Gegenwart und Zukunft. In: Bayrisches Landesvermessungsamt (Hrsg.): *Vorträge des 3. SAPOS-Symposiums*, München, 23.-24. Mai 2000.

- Hartmann, G.K., R. Leitinger (1984):** Range Errors due to ionospheric and tropospheric effects for signal frequencies above 100 MHz. *Bulletin Geodésique*, Nr. 58, 1984, 109-136.
- Hatch, R. (1982):** The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements. *Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning*, Las Cruces, New Mexico, USA, 1213-1232.
- Hatch, R., H.-J. Euler (1994):** A Comparison of Several AROF Kinematic Techniques. *Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-94, Salt Lake City, Utah, USA, 1994, 363-370.
- Hatch, R., J. Jung, P. Enge, B. Pervan (2000):** Civilian GPS: The Benefits of Three Frequencies. *GPS Solutions*, 3(4), Spring 2000, 1-9.
- Hein, G.W. (2000):** From GPS and GLONASS via EGNOS to Galileo – Positioning and Navigation in the Third Millennium. *GPS Solutions*, 3(4), Spring 2000, 39-47.
- Herring, T.A. (2002):** Stability of Global Geodetic Results. *EGS XXVII General Assembly*, European Geophysical Society Meeting, Nice, France, 21-26 April, 2002, <http://bowie.mit.edu/~tah>.
- Huddleston, G.K., H.L. Bassett (1993):** Radomes. In: Johnson, R.C. (Hrsg.): *Antenna Engineering Handbook*. 3rd Edition, Verlag McGraw-Hill, Inc., New York, Kapitel 44, 1-21.
- Hudnut, K., J. Galetzka, F. Wyatt, S. Dockter (2002):** *SCIGN Radome Project*, Internet-Dokumentation, <http://pasadena.wr.usgs.gov/scign/group/dome>.
- Hugentobler, U., T. Springer, G. Beutler (2001a):** Der Internationale GPS Service (IGS) und seine Produkte. In: *GPS-Trends und Realtime-Anwendungen*, DVW Schriftenreihe 41/2001, 111-126.
- Hugentobler, U., S. Schaer, P. Fridez (2001b):** *Bernese GPS Software Version 4.2*. Documentation, Astronomical Institute, University of Berne, February 2001.
- IfE und Geo++<sup>®</sup> (2000):** *AOAD/M\_T Choke Ring Antenna Absolute Phase Variations - Results of Absolute PCV Field Calibration at IfE and Geo++<sup>®</sup>*. Internet-Veröffentlichung, [http://www.ife.uni-hannover.de/AOA\\_DM\\_T](http://www.ife.uni-hannover.de/AOA_DM_T), Juni 2000.
- IGS (2001):** *International GPS Service - Information and Resources 2001*. IGS Central Bureau, JPL, Pasadena, California, USA.
- Imakiire, T., Y. Iimura, S. Saga, H. Morishita, A. Tsuchiya, F. Kudo, S. Ishikawa, Y. Iwana (1997):** Results of Phase Characteristics Measurements of GPS Receiver Antennas. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, Vol 43, Nr. 2, 1997, 79-90.
- Jackson, M., C. Meertens, V. Andreatta, T. Van Hove (2000):** *GPS Receiver and Antenna Testing Report for SuomiNet*. University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), Boulder, Colorado, USA, 2000.
- Jahn, C.H. (2001):** Ein neues aktives dreidimensionales Bezugssystem für Niedersachsen. *Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 239, Hannover 2001, 59-71.

- Jahn, C.H., T. Ballmann, U. Feldmann-Westendorff (2001):** SAPOS-Vernetzungstest 2001 - auf den Weg in den Regelbetrieb. *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung*, 51. Jahrgang, NaVKV 4/2001, 7-17.
- James, J.R., P.S. Hall (Hrsg.) (1989):** *Handbook of Microstrip Antennas*. Peter Peregrinus Ltd., London, 1989.
- Johnson, R.C. (Hrsg.) (1993):** *Antenna Engineering Handbook*. 3rd Edition, Verlag McGraw-Hill, Inc., New York, 1993.
- Joosten, P., T. Pany, J. Winkel (2002):** The impact of unmodelled multipath on ambiguity resolution. *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2002, Portland, Oregon, USA, September 24-27, 2002, 953-961.
- Kaniuth, K., D. Kleuren, H. Tremel, W. Schlüter (1998):** Elevationsabhängige Phasenzentrumsvariationen geodätischer GPS-Antennen. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, Heft 10/1998, 319-325.
- King, R.W., Y. Bock (1998):** *Documentation for the MIT GPS Analysis Software: GAMIT*. Version 9.7, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1998.
- Kleusberg, A. (1998):** Atmospheric Models from GPS. In: Teunissen, P.J.G., A. Kleusberg (Hrsg.): *GPS for Geodesy*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1998, 599-623.
- Klobuchar, J.A. (1996):** Ionospheric Effects on GPS. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 485-515.
- Köhnecke, H. (1998):** *Untersuchungen zum Multipath bei GPS Beobachtungen*. Diplomarbeit, Institut für Erdmessung, Universität Hannover, unveröffentlicht.
- Kouba, J., P. Héroux (2001):** Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 5(2), Fall 2001, 12-28.
- Krantz, E., S. Riley, P. Large (2001):** *GPS Antenna Design and Performance Advancements: The Trimble Zephyr*. Trimble Navigation Limited, Dayton, Ohio, USA.
- Kraus, J.D. (1988):** *Antennas*. 2nd Edition, Verlag McGraw-Hill, Inc., New York, 1988.
- Kunysz, W. (1998):** Effect of Antenna Performance on the GPS Signal Accuracy. *Proceedings of ION National Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Long Beach, California, USA, January 21-23, 1998.
- Kunysz, W. (2000a):** A Novel GPS Survey Antenna. *Proceedings of ION National Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Anaheim, California, USA, January 26-28, 2000.
- Kunysz, W. (2000b):** High Performance GPS Pinwheel Antenna. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2000, Salt Lake City, Utah, USA, September 19-22, 2000, 2506-2511.
- Langley, R.B. (1997a):** GPS Receiver System Noise. *GPS World*, June 1997, 40-45.
- Langley, R.B. (1997b):** GLONASS: Review and Update. *GPS World*, July 1997, 46-51.



- Langley, R.B. (1998a):** Propagation of GPS Signals. In: Teunissen, P.J.G., A. Kleusberg (Hrsg.): *GPS for Geodesy*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1998, 111-149.
- Langley, R.B. (1998b):** GPS Receivers and the Observables. In: Teunissen, P.J.G., A. Kleusberg (Hrsg.): *GPS for Geodesy*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1998, 151-185.
- Langley, R.B. (1998c):** A Primer on GPS Antennas. *GPS World*, July 1998, 50-54.
- Langley, R.B. (1999):** 1998: A Year of Innovation in (the) GPS World. *Annual General Meeting of the Association of New Brunswick Land Surveyors*, Fredericton, N.B., Canada, January 23, 1998.
- Leick, A. (1995):** *GPS Satellite Surveying*. 2nd Edition, Verlag John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
- Leistner, H. (2000):** *Roboterkalibrierung - Funktionales Modell*. Interner Bericht Institut für Erdmessung, Universität Hannover, Mai 2000.
- Liu, Jiyu (1991):** Multipath und GPS station Selection. *GPS World*, March 1991, 48.
- Loddo, S., D. Flament, J. Benedicto, P. Michel (1996):** EGNOS, the European Regional Augmentation to GPS and GLONASS. *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-96, Kansas City, Missouri, USA, September 17-20, 1996, 1143-1150.
- Loh, R. (1995):** Seamless Aviation: FAA's Wide Area Augmentation System. *GPS World*, April 1995, 20-28.
- MacMillan, D. (1995):** Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations. *Geophysical Research Letters*, Vol 22, Nr. 9, 1995, 1041-1044.
- Mader, G.L. (1999):** GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solutions*, 3(1), Summer 1999, 50-58.
- Mader, G.L. (2001):** A Comparison of Absolute and Relative GPS Antenna Calibrations. *GPS Solutions*, 4(4), Spring 2001, 37-40.
- Mader, G.L., F. Czopek (2001):** Calibrating the L1 and L2 Phase Centers of a Block IIA Antenna. *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2001, Salt Lake City, Utah, USA, September 11-14, 2001, 1979-1984.
- Mansfeld, W. (1998):** *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. Vieweg Verlag, Braunschweig, 1998.
- McDonald, K.D. (2002):** The European Galileo Program: Near Death, In Trouble or Healthy and On-Track? *GPSetc.com News*, GPS/GNSS newsletter, <http://www.navtechgps.com>, January 24, 2002.
- Menge, F. (1994):** *Zur Leistungsfähigkeit der GPS-Empfangssysteme Trimble SSE und Ashtech Z-XII unter Anti-Spoofing (AS)*. Diplomarbeit, Institut für Erdmessung, Universität Hannover, unveröffentlicht.

- Menge, F., G. Seeber, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz (1998):** Results of Absolute Field Calibrations of GPS Antenna PCV. *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-98, Nashville, Tennessee, USA, September 15-18, 1998, 31-38.
- Menge, F., G. Seeber (2000):** Untersuchungen und Beiträge zur Problematik der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen. In: Dietrich, R. (Hrsg.): *Deutsche Beiträge zu GPS-Kampagnen des Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) 1995-1998*, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, Reihe B, Heft Nr. 310, München 2000, 181-194.
- Montenbrunck, O., E. Gill (2000):** *Satellite Orbits - Models, Methods, and Applications*. Springer Verlag, Berlin, 2000.
- Moore, A., R. Weber (2002):** Workshop Recommendations. *Workshop Proceedings 2002 IGS-Workshop*, Network, Data and Analysis Center Workshop "Towards Real-Time", Ottawa, Canada, April 8-11, 2002.
- Muellerschoen, R.J., Y.E. Bar-Sever, W.I. Bertiger, D.A. Stowers (2001):** NASA's Global DGPS for High-Precision Users. *GPS World*, January 2001, 14-20.
- Müller, A. (2001):** Sachstand und Entwicklungstendenzen GPS und GLONASS. *Tagungsband DGON Symposium Positionierung und Navigation*, POSNAV 2001, Dresden, 6.-8. März 2001, 9-18.
- Niemeier, W. (2002):** *Ausgleichsrechnung*. Verlag Walter de Gruyter, Berlin New York, 2002.
- Park, K.D., J.L. Davis, P.O.J. Jarlemark, P. Elosegui, J.E. Normandeau, B.E. Corey, A.E. Niell, C.M. Meertens, V. Andretta (2002):** Multipath characteristics of GPS signals as determined from the Antenna and Multipath Calibration System. *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2002, Portland, Oregon, USA, September 24-27, 2002, 2103-2110.
- Parkinson, B.W. (1996):** Introduction and Heritage of NAVSTAR, Global Positioning System. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 3-28.
- Pelzer, H. (1985):** Grundlagen der mathematischen Statistik und der Ausgleichsrechnung. In: Pelzer, H. (Hrsg.): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung*. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1985, 121-152.
- Pinker, A., C. Smith, J. Day (2000):** Wide-Area Augmentation System (WAAS) - The Metamorphosis of a Major FAA Program. *GPS Solutions*, 3(4), Spring 2000, 48-57.
- Pozar, D.M., D.H. Schaubert (Hrsg.) (1995):** *Microstrip Antennas. The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*. A Selected Reprint Volume, IEEE Antennas and Propagation Society. IEEE Press. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1995.
- Rama Rao, B., J.H. Williams, E.N. Rosario, R.J. Davis (2000):** GPS Microstrip Antenna Array on a Resistivity Tapered Ground Plane for Multipath Mitigation. *Proceedings of*

*the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GPS-2000, Salt Lake City, Utah, USA, September 19-22, 2000, 2468-2476.*

**Ray, J.K. (2000):** *Mitigation of GPS Code and Carrier Phase Multipath Effects Using a Multi-Antenna System.* PhD Thesis, UCGE Reports No. 20136, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Kanada.

**Ray, J. (2002):** *IGS/BIPM Pilot Project to Study Accurate Time and Frequency Comparisons Using GPS Phase and Code Measurements,* Internet-Dokumentation, <http://maia.usno.navy.mil/gpst.html>.

**Rothacher, M., S. Schaer, L. Mervart, G. Beutler (1995):** Determination of Antenna Phase Center Variations using GPS Data. In: Gendt, G., G. Dick (Hrsg.): *Special Topics and New Directions, Proceedings of the 1995 IGS Workshop*, Potsdam, May 15-17, 1995, 205-220.

**Rothacher, M. (1999):** Bestimmung von Variationen der Antennenphasenzentren mit GPS-Beobachtungen: Vergleiche und Kombination. In: Campbell, J., B. Görres (Hrsg.): *Proceedings Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen*, Geodätisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 28. April 1999.

**Rothacher, M. (2001):** Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. *GPS Solutions*, 4(4), Spring 2001, 55-60.

**Rothacher, M., G.L. Mader (2002):** Receiver and Satellite Antenna Phase Center Offsets and Variations. *Workshop Proceedings 2002 IGS-Workshop*, Position Paper Antenna Session, Network, Data and Analysis Center Workshop "Towards Real-Time", Ottawa, Canada, April 8-11, 2002.

**Rothacher, M., R. Schmid (2002):** GPS-Antennenkalibrierungen aus nationaler und internationaler Sicht. In: Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (Hrsg.): *Vorträge des 4. SAPOS-Symposiums*, Hannover, 21.-23. Mai 2002.

**Rothammel, K. (1995):** *Rothammels Antennenbuch.* 11. Auflage, Verlag Franckh-Kosmos, Stuttgart, 1995.

**RTCM 2.3 (2001):** *RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Version 2.3.* Radio Technical Commission For Maritime Services, Special Committee No. 104, RTCM Paper 136-2001/SC104-STD.

**Santerre, R. (1989):** *GPS Satellite Sky Distribution: Impact of the Propagation of Some Important Errors in Precise Relative Positioning.* Dissertation, Technical Report 145, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, Kanada.

**Santerre, R. (1991):** Impact of Satellite Sky Distribution. *Manuscripta Geodaetica*, Nr. 16, 28-53.

**Schmid, R., M. Rothacher (2002):** Ergebnisse und Analyse des Vergleichstests. In: Campbell, J., G. Seeber (Hrsg.): *Proceedings 4. GPS-Antennenworkshop 2002*, Hannover, 21. Mai 2002.

**Schmitz, M. (2001):** Spezielle Untersuchungen und Ergebnisse zum PCV von GPS-Antennen. *Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 239, Hannover 2001, 101-112.

- Schüler, T. (2001):** *On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation*. Dissertation, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, University of the Federal Armed Forces Munich, Institute of Geodesy and Navigation, Volume 73, 2001.
- Schupler, B.R., T.A. Clark (1991):** How different Antennas Affect the GPS Observable. *GPS World*, November 1991, 32-36.
- Schupler, B.R., T.A. Clark (1994):** Signal Characteristics of GPS User Antennas. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, Vol 41, Nr. 3, 1994, 277-295.
- Schupler, B.R., T.A. Clark (2000):** High Accuracy Characterization of Geodetic GPS Antennas Using Anechoic Chamber and Field Tests. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2000, Salt Lake City, Utah, USA, September 19-22, 2000, 2499-2505.
- Schupler, B.R., T.A. Clark (2001):** Characterizing the Behavior of Geodetic GPS Antennas. *GPS World*, February 2001, 48-55.
- Seeber, G. (1993):** *Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications*. Verlag Walter de Gruyter, Berlin New York, 1993.
- Seeber, G., F. Menge, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz (1998):** Precise GPS Positioning Improvements by Reducing Antenna and Site Dependent Effects. In: Brunner, F.K. (Hrsg.): *Advances in Positioning and Reference Frames*. Proceedings of the 1997 Scientific Assembly of the International Association of Geodesy, Rio de Janeiro, Brasil, September 3-9, 1997, IAG Symposia, Vol 118, Springer Verlag.
- Shaw, M., K. Sandhoo, D. Turner (2000):** Modernization of the Global Positioning System. *GPS World*, September 2000, 36-44.
- Sillard, P., Z. Altamimi, C. Boucher (1998):** The ITRF96 Realization and its Associated Velocity Field. *Geophysical Research Letters*, Vol 25, Nr. 17, 1998, 3223-3226.
- Sleewaegen, J.-M. (1997):** Multipath Mitigation, Benefits from using the Signal-to-Noise Ratio. *Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-1997, Kansas City, Missouri, USA, September 16-19, 1997, 531-540.
- Spilker Jr., J.J. (1996a):** GPS Signal Structure and Theoretical Performance. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 57-119.
- Spilker Jr., J.J. (1996b):** Fundamentals of Signal Tracking Theory. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 245-327.
- Spilker Jr., J.J., B.W. Parkinson (1996):** Overview of GPS Operation and Design. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 29-55.

- Sims, M.L. (1985):** Phase Center Variations in the Geodetic TI4100 GPS Receiver System's Conical Spiral Antenna. *Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with GPS*, Rockville, MD, USA, April 15-19, 1985, 227-244.
- Smith, E.K., S. Weintraub (1953):** The constants in the equation of atmospheric refractive index at radio frequencies. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, Vol. 41, No. 8, 1035-1037.
- Springer, T.A. (1999):** *Modeling and Validating Orbits and Clocks Using the GPS*. Dissertation, Astronomisches Institut, Universität Bern, Bern, Schweiz, November 1999.
- Springer, T.A. (2000a):** Common Interests of the IGS and the IVS. *Proceedings of the First IVS General Meeting*, Kötzing, February 21-24, 2000, 296-305.
- Springer, T.A. (2000b):** *Persönliche Mitteilungen*.
- Stirner, E. (1977):** *Antennen, Band 1: Grundlagen*. Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1977.
- Stirner, E. (1980):** *Antennen, Band 2: Praxis*. Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1980.
- Stirner, E. (1985):** *Antennen, Band 3: Meßtechnik*. Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1985.
- Suckrow, S., M. Böttcher, M. Bashir, B. Edelmann (1995):** *Stationäre und mobile Antennen*. Verlag Technik GmbH, Berlin, 1995.
- Tetewsky, A.K., F.E. Mullen (1997):** Carrier Phase Wrap-up Induced by Rotating GPS Antennas. *GPS World*, February 1997, 51-57.
- Teunissen, P.J.G. (1998):** GPS Carrier Phase Ambiguity Fixing Concepts. In: Teunissen, P.J.G., A. Kleusberg (Hrsg.): *GPS for Geodesy*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1998, 319-388.
- Teunissen, P.J.G., A. Kleusberg (Hrsg.) (1998):** *GPS for Geodesy*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- Tatarnikov, D. (2001):** *Persönliche Mitteilungen*.
- Tranquilla, J.M. (1986):** Multipath and Imaging Problems in GPS Receiver Antennas. *Proceedings of the 4th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Austin, Texas, USA, April 28 - May 2, 1986, 557-571.
- Tranquilla, J.M., B.G. Colpitts (1989):** GPS Antenna Design Characteristics for High-Precision Applications. *Journal of Surveying Engineering*, Vol 115, Nr. 1, February, 2-14.
- Tranquilla, J.M., B.G. Colpitts, J.P. Carr (1989):** Measurement of Low-Multipath Antennas for TOPEX. *Proceedings of the 5th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Las Cruces, New Mexico, USA, March 13-17, 1989, 356-361.
- UNAVCO (1995):** *Receiver and Antenna Test Report*. University NAVSTAR Consortium (UNAVCO) Academic Research Infrastructure (ARI), Boulder, Colorado, USA, 1995.
- Van Dierendonck, A.J. (1996):** GPS Receivers. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 329-407.

- Van Dierendonck, A.J., P. Fenton, T. Ford (1992):** Theory and Performance of Narrow Correlator Technology in GPS Receiver. *NAVIGATION*, Journal of the Institute of Navigation, Vol. 39, Nr. 3, 1992.
- Van Dierendonck, A.J., C. Hegarty (2000):** The New L5 Civil GPS Signal. *GPS World*, September 2000, 64-71.
- Van Nee, R.D.J. (1995):** *Multipath and Multi-Transmitter Interference in Spread-Spectrum Communication and Navigation Systems*. Dissertation, Delft University of Technology, Delft University Press, 1995.
- Vogel, H. (1997):** *Gerthsen Physik*. 19. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1997.
- Vollath, U., E. Roy (2001):** Ambiguity Resolution using Three Carriers - Hardware Simulation and Performance Analysis. *Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, KIS2001, Banff, Alberta, Canada, June 5-8, 2001, 311-316.
- Völksen, C. (2000):** *Die Nutzung von GPS für die Deformationsanalyse in regionalen Netzen am Beispiel Islands*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 237, Hannover 2000.
- Völksen, C., F. Menge (2002):** The impact of different GPS antenna calibration models on the computations in the EUREF Permanent Network. *Proceedings of the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF)*, Ponta Delgada, Portugal, June 5-8, 2002.
- Wanninger, L. (1994):** *Der Einfluss der Ionosphäre auf die Positionierung mit GPS*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 201, Hannover 1994.
- Wanninger, L. (2000):** *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen*. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 508, München 2000.
- Wanninger, L. (2001):** Kalibrierung von Phasenmehrwegeeffekten auf GPS-Referenzstationen. *Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 239, Hannover 2001, 123-134.
- Wanninger, L. (2002):** Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, Heft 1/2002, 51-58.
- Wanninger, L., J. Böhme (2000):** GPS-Antennenkalibrierungen am Geodätischen Institut der TU Dresden. In: Seeber, G., F. Menge, V. Böder (Hrsg.): *Proceedings GPS-Antennenworkshop 2000*, Hannover, 10. Mai 2000.
- Wanninger, L., M. May (2000):** Carrier Phase Multipath Calibration of GPS Reference Stations. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2000, Salt Lake City, Utah, USA, September 19-22, 2000, 132-144.
- Wanninger, L., V. Frevert, S. Wildt (2000):** Der Einfluss der Signalausbreitung auf die präzise Positionierung mit GPS. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, Heft 1/2000, 8-16.

- Ward, P. (1996):** GPS Satellite Signal Characteristics. In: Kaplan, E.D. (Hrsg.): *Understanding GPS: Principles and Applications*. Artech House, Boston, 83-117.
- Webb, F.H., J.F. Zumberge (1997):** *An Introduction to GIPSY/OASIS-II*. Rep. JPL D-11088, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA, 1997.
- Weber, T., C. Schäfer (2001):** Galileo - eine neue Ära der Satellitennavigation. *Tagungsband DGON Symposium Positionierung und Navigation*, POSNAV 2001, Dresden, 6.-8. März 2001, 123-132.
- Wells, D. (Hrsg.) (1986):** *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates, Fredericton, Kanada.
- Williams, J.H., R.J. Davis, E.N. Rosario (2000):** Multipath Mitigation Performance of Planar GPS Adaptive Antenna Arrays for Precision Landing Ground Stations. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2000, Salt Lake City, Utah, USA, September 19-22, 2000, 1309-1316.
- Wohlleben, R., H. Mattes, O. Lochner (1988):** The "dynamics" of the MPIfR anechoic chamber between 300 and 2 mm wavelength. *Proceedings of the 11th ESTEC Antenna Workshop on Antenna Measurements*, Onsala, Sweden, 1988, 225-235.
- Wu, J.T., S.C. Wu, G.A. Haji, W.I. Bertiger, S.M. Lichten (1993):** Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, Vol 18, 91-98.
- Wübbena, G. (1989):** The GPS Adjustment Software Package GEONAP - Concepts and Models. *Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Las Cruces, New Mexico, USA, 452-461.
- Wübbena, G. (1991):** *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 168, Hannover 1991.
- Wübbena, G. (2001):** Zur Modellierung von GNSS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. *Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 239, Hannover 2001, 143-155.
- Wübbena, G., F. Menge, M. Schmitz, G. Seeber, C. Völksen (1996):** A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-1996, Kansas City, Missouri, USA, September 17-20, 1996, 1205-1214.
- Wübbena, G., M. Schmitz, G. Boettcher, F. Menge, V. Böder, H. Leistner, G. Seeber (2000):** Absolute Feldkalibrierung von GPS-Antennen - Ergebnisse. In: Seeber, G., F. Menge, V. Böder (Hrsg.): *Proceedings GPS-Antennenworkshop 2000*, Hannover, 10. Mai 2000.
- Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000):** Automated Absolute Field Calibration of GPS-Antennas in Real-Time. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2000, Salt Lake City, Utah, USA, September 19-22, 2000, 2512-2522.

**Wübbena, G., S. Willgalis (2001):** State Space Approach for Precise Real Time Positioning in GPS Reference Networks. *Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, KIS2001, Banff, Alberta, Canada, June 5-8, 2001, 72-79.

**Wübbena, G., A. Bagge, M. Schmitz (2001):** RTK Networks based on Geo++ GNSMART - Concepts, Implementation, Results. *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GPS-2001, Salt Lake City, Utah, USA, September 11-14, 2001, 368-378.

**Wübbena, G., M. Schmitz, G. Boettcher, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000):** Antennenkalibrierung: Anforderungen, Aktuelle Absolute Ergebnisse, Anwendungen und Vergleiche. In: Campbell, J., B. Görres (Hrsg.): *Proceedings 3. GPS-Antennen-Workshop 2001*, Geodätisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 11. Mai 2001.

**Wübbena, G., M. Schmitz (2002):** Weitere Aspekte zur Kalibrierung von GNSS-Systemen. In: Campbell, J., G. Seeber (Hrsg.): *Proceedings 4. GPS-Antennenworkshop 2002*, Hannover, 21. Mai 2002.

**Wübbena, G., M. Schmitz (2003):** *Persönliche Mitteilungen.*

**Zhu, S.Y., F.-H. Massmann, Y. Yu, C. Reigber (2001):** *Satellite Antenna Phase Center Offsets and Scale Errors in GPS Solutions.* Scientific Technical Report 01/12, Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ), Division 1, 9-17.

**Zielinski, J.B. (1988):** Covariances in 3D Network Resulting from Orbital errors. *Proceedings of the International GPS-Workshop*, Darmstadt, April 10-13, 1988, In: *Lecture Notes in Earth Sciences*, GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying, Springer Verlag, Berlin, 2000, 504-514.

**Zumberge, J.F., W.I. Bertiger (1996):** Ephemeris and Clock Navigation Message Accuracy. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications.* Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 585-599.



## Danksagung

Die vorliegende Dissertation gründet sich auf Arbeiten am Institut für Erdmessung, Universität Hannover, in der Arbeitsgruppe Satellitengeodäsie unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber. Während dieser Zeit wurde meine Tätigkeit in mehreren Forschungsprojekten durch das *Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)* gefördert. Dabei bestand eine enge Kooperation und Zusammenarbeit mit der Firma Geo++<sup>®</sup> GmbH.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber, der mir die Möglichkeit für diese Arbeiten gegeben, die wissenschaftliche Betreuung und das Hauptreferat übernommen und ein stets sehr angenehmes Arbeitsklima am Institut geschaffen hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. James Campbell danke ich für die Übernahme des Korreferats und die Anregungen für die Fertigstellung.

Ich danke Dr. Gerhard Wübbena für den regen Austausch und den Zugang zu seiner unerschöpflichen GPS-Expertise. Ein ganz spezieller Dank geht - von A bis Z - an Dr. Volker Böder, Dr. Martin Schmitz, Dr. Christof Völksen und Stefan Willgalis für die vielen Anregungen, Hinweise, Aufmunterungen.

Ein Dank geht natürlich auch an alle anderen ehemaligen Kollegen am Institut, ebenso Studenten und Diplomanden. Für die gute Zusammenarbeit bedanke ich mich bei den vielen Instituten, Arbeitsgruppen und Behörden, besonders auch der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN), mit denen ich gemeinsam an verschiedenen Projekten gearbeitet habe.

Ich möchte auch meinen Eltern Danke sagen, die mir diesen Weg ermöglicht und mich immer unterstützt haben. Ganz besonders danke ich meiner Frau Tanja und meinen beiden Töchtern Kaja Solveig und Jule Malin, die mich und die ich besonders in der letzten Zeit oft missen musste(n). Dieser Rückhalt der Familie und die steten Ermutigungen waren einfach unverzichtbar!

## Lebenslauf

Falko Menge

geboren am 14.05.1968 in Hannover

verheiratet mit Tanja Menge, geb. Schmieder, 2 Kinder Kaja Solveig und Jule Malin

1974 - 1978	Freiherr-vom-Stein Grundschule Wettbergen (Hannover)
1978 - 1980	Orientierungsstufe KGS Hemmingen
1980 - 1987	Humboldt-Gymnasium Hannover
1987 - 1988	Grundwehrdienst
1988	Praktikum Amt für Agrarstruktur Hannover
1988 - 1994	Studium des Vermessungswesens an der Universität Hannover
1990 - 1994	Wissenschaftliche Hilfskraft am Geodätischen Institut und am Institut für Erdmessung, Universität Hannover
1994 - 2001	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Erdmessung, Universität Hannover, Arbeitsgruppe Satellitengeodäsie
2001 - 2003	Vorbereitungsdienst zum höheren technischen Verwaltungsdienst bei der Bezirksregierung Hannover

# Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover

*(Eine vollständige Liste der Wiss. Arb. ist beim Geodätischen Institut, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover erhältlich.)*

- Nr. 218 KUHLMANN, H.: Ein Beitrag zur Überwachung von Brückenbauwerken mit kontinuierlich registrierten Messungen (Diss. 1996)
- Nr. 219 KNIPP, K.: Untersuchungen zur Verwaltung und Verarbeitung von abbildenden Radardaten des Fernerkundungsatelliten ERS-1(Diss. 1996)
- Nr. 220 LEE, J. O.: Untersuchung von Verfahren zur kombinierten Aerotriangulation mittels integrierten GPS/INS (Diss. 1996)
- Nr. 221 SIEBE, E.: Komponenten einer digitalen photogrammetrischen Stereo-Arbeitsstation und Auswertungen von Scanner-Daten (Diss. 1997)
- Nr. 222 SCHIEWE, J.: Geo-Modellierungen mit Daten des Weltraumsensors MOMS-02 (Diss. 1997)
- Nr. 223 WILLEKE, U.: Zur Anwendung von Expertensystemen in der Grundstückswertermittlung (Diss. 1997)
- Nr. 224 GÜLAL, E.: Geodätische Überwachung einer Talsperre; eine Anwendung der KALMAN-Filtertechnik (Diss. 1997)
- Nr. 225 SCHMITZ, M.: Untersuchungen zur strengen GPS Parametrisierung in der gemeinsamen Ausgleichung von kinematischem GPS und Aerotriangulation (Diss. 1998)
- Nr. 226 GENS, R.: Quality assessment of SAR interferometric data
- Nr. 227 FESTSCHRIFT Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Gottfried Konecny zur Emeritierung (1998)
- Nr. 228 FOPPE, K.: Abschlußbericht DFG-Projekt Pe 187/9 "Geotechnisches Informationssystem"
- Nr. 229 BEHREND, D.: Untersuchungen zur Schwerefeldbestimmung in den europäischen Randmeeren (Diss. 1999)
- Nr. 230 SANTITAMNONT, P. Interferometric SAR Processing for Topographic Mapping (Diss. 1998)
- Nr. 231 SCHWIEGER, V. Ein Elementarfehlermodell für GPS-Überwachungsmessungen - Konstruktion und Bedeutung interepochaler Korrelationen (Diss. 1998)
- Nr. 232 POLLAK, B. Ein rechnergestütztes Planungssystem für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie (Diss. 1999)
- Nr. 233 GBEL, F. E.: Nutzung von Satellitendaten für Landesvermessungszwecke in Entwicklungsländern am Beispiel der Elfenbeinküste (Diss. 1999)
- Nr. 234 LABBABIDI, A. R.: Beitrag zur Eisenbahntrassierung mit nicht linear gekrümmten Bögen (Diss. 1999)
- Nr. 235 GOFFINET, P.: Qualitätssteigerung der Seevermessung und Navigation durch neuartige Beschickungsverfahren (Diss. 1999)
- Nr. 236 ZHANG, S.: Interpolation of Geoidal/Quasigeoidal Surfaces for Height Determination with GPS (Diss. 1999)
- Nr. 237 VÖLKSEN, C.: Die Nutzung von GPS für die Deformationsanalyse in regionalen Netzen am Beispiel Islands (Diss. 2000)
- Nr. 238 ZAHRAN, K.: Accuracy Assessment of Ocean Tide Loading Computations for Precise Geodetic Observations
- Nr. 239 Festschrift: Univ. Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber zum 60. Geburtstag
- Nr. 240 QU, WEIDONG: Zur Anwendung der Fuzzy-Clusteranalyse in der Grundstückswertermittlung. (Diss. 2000)
- Nr. 241 Festschrift: em. Univ. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Torge zum 70. Geburtstag
- Nr. 242 FOPPE, Karl: Kombination von inertialen und satellitengestützten Beobachtungsverfahren Zur ingenieurgeodätischen Überwachung von Brückenbauwerken (Diss.2001)
- Nr. 243 PAKZAD, Kian: Wissensbasierte Interpretation von Vegetationsflächen aus multitemporalen Fernerkundungsdaten (Diss. 2001)
- Nr. 244 LENK, Ulrich: -2.5D-GIS und Geobasisdaten – Integration von Höheninformation und Digitalen Stationsmodellen (Diss. 2002)
- Nr. 245 BÖDER, Volker: Zur hochpräzisen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen (Diss. 2002)
- Nr. 246 KARANJA, F.N.: Use of Knowledge Based Systems for the Detection and Monitoring of Unplanned Developments (Diss. 2002)
- Nr. 247 MENGE, Falko: Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung (Diss. 2003)
- Nr. 248 FEI, Lifan: A Method of Automated Cartography Displacement - On the Relationship between Street and Buildings (Diss. 2002)

*Die Arbeiten werden im Rahmen des wissenschaftlichen Schriftenaustausches verteilt und sind nicht im Buchhandel erhältlich. Der Erwerb ist zu einem Stückpreis von € 25,- bei den herausgebenden Instituten möglich.*