

Untersuchungen zum GPS-Satellitenempfang in Gebäuden

Bernd Eissfeller, Andreas Teuber, Universität der Bundeswehr München

Peter-René Zucker, SiRF Technology GmbH

Zusammenfassung

GPS-Signale, die eine Wand durchdringen, werden in Abhängigkeit von den Baumaterialien zusätzlich um den Faktor 100 und mehr gedämpft. Gegenüber einem Outdoor-Empfänger, der das Signal innerhalb weniger Sekunden akquirieren kann, benötigt derselbe Empfänger unter den Bedingungen des Innenraumes sehr viel länger, um das Nutzsignal im Rauschen zu erkennen. Er müsste hierbei über einen längeren Zeitraum mitteln, um zu einem brauchbaren Signal-zu-Rauschverhältnis zu kommen. Lange Wartezeiten sind jedoch für den Nutzer nicht zumutbar. Die Standardlösung zum Problem der Akquisition unter Indoor Bedingungen setzt sich immer aus zwei Teilansätzen zusammen: Assistenz durch ein Mobilfunknetz und Parallelisierung des Rechenprozesses bei der Satellitensuche durch eine Blockkorrelation. Durch diese beiden Maßnahmen kann zum einen der Suchbereich, meistens die Frequenzunsicherheit, verkleinert werden, zum anderen die Rechenleistung des Empfängers bei der Korrelation um einen Faktor 500 und mehr gesteigert werden. In dem Papier werden nach einem kurzen Abriss der physikalischen Randbedingungen der Indoor-Positionierung Testergebnisse mit einem Empfänger vorgestellt, der die Satellitenakquisition mittels Blockkorrelation betreibt. Die Tests wurden sowohl in realen Umgebungen als auch unter Nutzung eines GPS-Signalsimulators im Labor durchgeführt.

1 Einleitung

Der Empfang von GPS-Signalen in einer Tiefgarage galt nach der herrschenden Lehrmeinung jahrelang als unmöglich. Hier handelt es sich jedoch um eine Fehleinschätzung, bei der angenommen wird, dass die kommerziell erhältliche Empfängertechnik die ultimative Antwort auf die physikalischen Randbedingungen ist. Dies ist natürlich insbesondere im Low-Cost-Bereich nicht der Fall, da hier beliebig viele Dezibel an Empfindlichkeit zugunsten einer billigen Lösung verschenkt werden. Die Ausbreitungsphysik einer elektromagnetischen Welle des GPS im L-

Band sagt eindeutig aus, dass obwohl die bereits sehr niedrigen GPS Außenraumsignalpegel beim Eintritt in ein Gebäude nochmals erheblich reduziert werden, ein messbarer Signalpegel in jedem Fall auch in der Tiefgarage vorhanden ist. Die zusätzlich auftretende Dämpfung muss durch eine entsprechende Steigerung der Rechenleistung im Vergleich zum Standardempfänger ausgeglichen werden. Der begrenzende Faktor der Indoor-Ortung ist somit nicht der Signalpegel selbst, sondern die maximal mögliche Rechenleistung eines ASICs. Diese wird im Wesentlichen durch den Entwicklungsstand der Halbleitertechnik festgelegt.

2 Theoretische Überlegungen zum Indoor-Empfang

2.1 Indoor-Umgebungen

Die zusätzliche Dämpfung, die ein GPS-Signal beim Durchtritt durch eine Wand erfährt, hängt von den elektrischen Eigenschaften des Baustoffes ab, aus dem das Bauelement hergestellt ist. GPS-Signale sind im Inneren eines Gebäudes um 20-30 dB (Faktor 100-1000) schwächer als im Außenraum. Bei der realen Wellenausbreitung wird diese Dämpfungsproblematik aufgrund der Mehrwegeausbreitung, Beugung und Brechung etwas entschärft, da durch diese Phänomene die Welle auch auf alternativen Wegen in einen Innenraum eindringen kann. Für einige Bauwerke lassen sich mit Hilfe von der Literatur zu entnehmenden Tabellen (Stone, 1997) die folgenden Dämpfungen für das L-Band abschätzen:

- Wohnhäuser: 5 bis 15 dB
- Historische Gebäude: 25 bis 35 dB
- Bürogebäude: 30 dB
- Tiefgaragen: > 30 dB

2.2 Signal-zu-Rauschverhältnis

Bei der GPS-Signalakquisition wird das ankommende GPS-Signal – aufgespalten in eine „in-phase“ und eine „quadra-phase“-Komponente – mit dem Referenzsignal korreliert und über einen bestimmten Zeitraum kohärent integriert. Die Anzahl der Samples und damit die Länge des Zeitraumes der Integration entscheidet darüber, wie stark das Signal-zu-Rauschverhältnis, das nach Heruntermischen des Signals auf die Zwischenfrequenzebene zunächst sehr gering ist, angehoben werden kann. Es gilt:

$$\frac{S}{N_{\text{koh}}} = \sqrt{2n} \frac{S}{N_{\text{ZF}}} \quad (1)$$

wobei S/N_{ZF} das Signal-zu-Rauschverhältnis auf der Zwischenfrequenzebene bezeichnet und S/N_{koh} nach der kohärenten Integration. n ist die Anzahl der Samples. Eine sichere Signalakquisition ist nur möglich, wenn S/N_{koh} genügend groß ist. Wie weiter oben erwähnt ist bei Indoor-Signalen das Leistungsniveau des Trägersignals um einen Faktor 100-1000 geringer als bei Outdoor-Signalen. Die Idee, die Integrationszeit einfach um so viele Samples zu verlängern, bis ein genügend großes S/N_{koh} erreicht ist, wird zwar grundsätzlich realisiert, stößt aber bald an Grenzen, z. B. weil alle 20 ms das unbekannte Navigationsdatenbit eine erfolgreiche Korrelation verhindern kann. Bei einer Integration über 20 ms ergibt sich eine Anzahl der Samples von 20460 und damit eine Steigerung des S/N durch die kohärente Integration um den Faktor 202. Dies ist jedoch in der Regel nicht ausreichend, so das

ein zweiter, nicht-kohärenter Integrationsprozess angeschlossen werden muss, der für den Outdoor-Fall üblicherweise nicht erforderlich ist. Bei der nicht-kohärenten Integration werden die „in-phase“- und „quadra-phase“-Komponente quadriert, weiter gemittelt und wieder über eine Anzahl von Samples aufsummiert. Durch diesen Vorgang werden Phasenfehler und Navigationsdatenbit beseitigt, die nicht-kohärente Integration unterliegt also keinem strengen Zeitlimit wie die kohärente. Ein großes Problem bei der nicht-kohärenten Integration ist der Quadrierverlust, der ungünstigerweise für geringe Signal-zu-Rauschverhältnisse nach der kohärenten Integration besonders groß ist. Damit kann dieser alles zunichte machen, was kohärent erreicht worden ist. Es ist deswegen wichtig, dass man am Ende der kohärenten Integration über ein S/N von $> 1,0$ verfügt. Das Signal-zu-Rauschverhältnis S/N_{n-koh} nach der nicht-kohärenten Integration ergibt sich zu:

$$\frac{S}{N_{n-koh}} = \sqrt{m} \frac{S}{N_{koh}} S_L \quad (2)$$

wobei S_L der Quadrierverlust und m die Anzahl der nicht-kohärenten Integrationsschritte ist.

Tabelle 1 gibt einen zahlenmäßigen Überblick über die wichtigsten Parameter von Outdoor- und Indoor-GPS im Vergleich.

Parameter	Outdoor	Indoor
Empfangsleistung Träger C	$10^{-15.6} \text{ W}$	$10^{-18.0} \text{ W}$
$N_0 = k_B T_{sys}$ $T_{sys} = 371^\circ \text{ K}$ $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	$5,12 \cdot 10^{-21} \text{ J}$	$5,12 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Zwischenfrequenzbandbreite B_{ZF}	$2,4 \cdot 10^6 \text{ Hz}$	$2,4 \cdot 10^6 \text{ Hz}$
$S/N_{ZF} = [C/(N_0 \cdot B_{ZF})]^{0,5}$	0,14	0,01
Integrationszeit T	0,001 s	0,020 s
Kohärente Samples n	1023	20460
Implementierungsverlust	0,8	0,8
$S/N_{koh.}$	5,2	1,4
Nicht-kohärente Samples m		50
Quadrierverlust		0,55
$S/N_{n-koh.}$		5,4

Tab. 1: Parameter für Indoor und Outdoor GPS im Vergleich

2.3 Akquisitionszeit

Das S/N ist prinzipiell eine statistische Größe. Um eine sichere und damit richtige Akquisition zu garantieren, sollte die Wahrscheinlichkeit für einen falschen Alarm (Signal ist nicht vorhanden, aber dennoch wird die Akquisition für erfolgreich erklärt) möglichst gering gehalten werden. Abb. 1 veranschaulicht die Anzahl der nötigen nicht-kohärenten Integrationsschritte in Abhängigkeit vom Signal-zu-Rauschverhältnis nach der kohärenten Integration für verschiedene Falschalarm-Wahrscheinlichkeiten und einer Wahrscheinlichkeit für eine richtige Detektion von 90%.

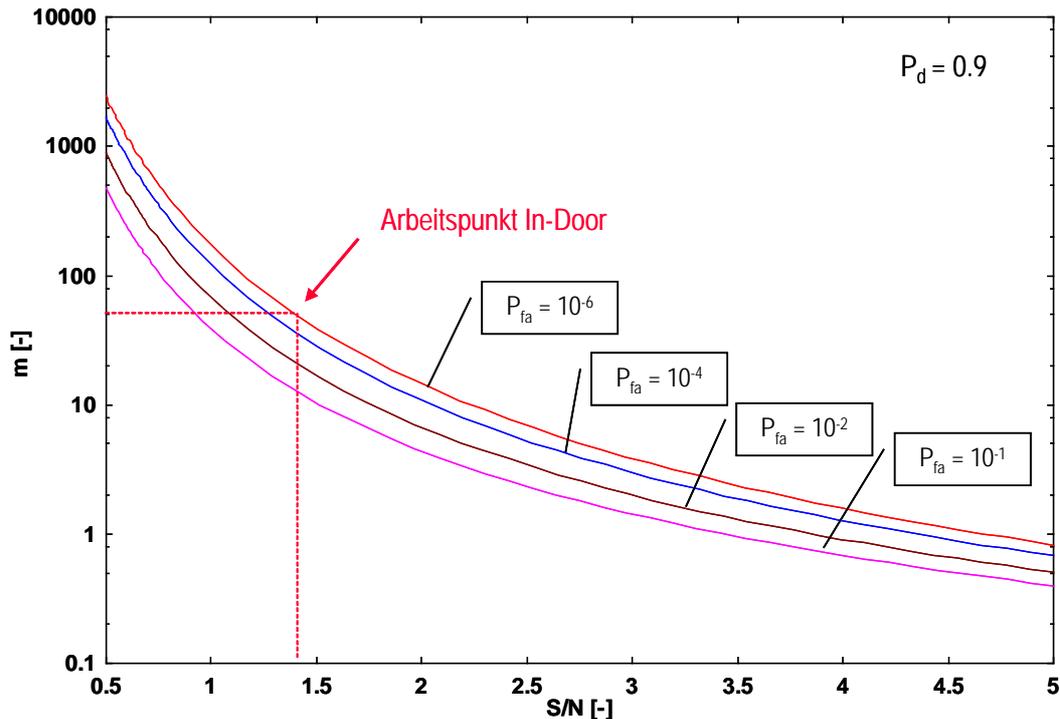


Abb. 1: Falschalarm-Wahrscheinlichkeiten, kohärentes S/N und Anzahl der nicht-kohärenten Samples für Wahrscheinlichkeit einer richtigen Detektion von 0,9

Bei einem für Indoor-Bedingungen realistischen S/N_{koh} von 1,4 (Tabelle 1) und einer gewünschten Falschalarm-Wahrscheinlichkeit von 10^{-6} ergibt sich nach Abb. 1 eine Anzahl von ca. 50 erforderlichen nicht-kohärenten Integrationsschritten. Dies würde schließlich zu einer Akquisitionszeit von 1 s führen (50×20 ms). Dies ist insofern problematisch, als dass es sich aufgrund von Frequenz- und Zeitunsicherheiten bei der Akquisition nicht um einen einmaligen Prozess handelt, sondern sich dieser vielfach wiederholt, weil der Suchraum in abgegrenzte Zellen bestimmter Doppler-Bandbreiten sowie den C/A-Code-Chips auf der Zeitachse unterteilt ist. Bei einer C/A-Codelänge von 1023 Chips und einer angenommenen Anzahl von 40 Abschnitten auf der Frequenzachse ergibt dies rund 41000 Zellen. Unter der Annahme von Nyquist-Faktor zwei, der Tatsache, dass es sich um zwei Signale (in-phase, quadra-phase) handelt und mindestens vier Satelliten für eine Navigationslösung erforderlich sind, ist die Zahl der Zellen noch mit einem Sampling-Faktor von 16 zu multiplizieren. Das ergibt eine Anzahl von $N_S = 654720$ Samples. Die Akquisitionszeit berechnet sich wie folgt:

$$T_{\text{Akq}} = \frac{N_S}{N_{\text{Corr}}} T_{\text{Dwell}} \quad (3)$$

Unter Anwendung von (3) würde dies bei einem Standardempfänger mit einer Anzahl von parallel einsetzbaren Korrelatoren von $N_{\text{corr}} = 36$ und einer Verweildauer pro Zelle von $T_{\text{Dwell}} = 1$ s zu einer theoretischen Akquisitionszeit von knapp über 5 Stunden führen. Die eigentliche Herausforderung des Indoor-Positionierens liegt also darin, diese Akquisitionszeit maßgeblich zu verkürzen. Grundsätzlich gibt es dafür zwei Ansätze.

Der erste heißt Assisted-GPS (A-GPS) und schränkt von vornherein die Zahl der Samples ein. Dies lässt sich erreichen, indem dem Indoor-Empfänger Hilfsinformationen - üblicherweise unter Nutzung zellularer Netze - übermittelt werden. Diese Hilfsinformationen können von einer nahen Outdoor-GPS-Station stammen und Angaben über Ephemeriden, GPS-Zeit, ein Frequenz- und Zeitsignal oder auch DGPS-Korrekturen enthalten.

Der zweite Ansatz sieht eine schnellere Korrelation vor, der mit einem höheren Rechenaufwand verbunden ist. Dafür gibt es wiederum zwei verschiedene Herangehensweisen. Erstens kann versucht werden, dieses Problem auf algorithmischer Ebene zu lösen. In diesem Fall findet die Korrelation nicht im Zeitbereich, sondern nach einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) von empfangenen und Referenzsignal im Frequenzraum statt. Der rechentechnische Aufwand ist hier erheblich geringer. Zweitens kann unter Verzicht auf die Transformation von vornherein die Anzahl der parallel verwendeten Korrelatoren massiv erhöht werden. Dieser Ansatz wird von der Firma SiRF Technologies verfolgt, dessen High Sensitivity-Chip, der im Rahmen dieser Arbeit einem ausführlichen Test unterzogen wurde und dessen Ergebnisse im nächsten Kapitel vorgestellt werden. Mit Blick in die Zukunft ist eine Kombination beider Ansätze (A-GPS + Blockkorrelation) selbstverständlich möglich und auch sinnvoll.

3 Praxistest eines High Sensitivity Chips

3.1 High Sensitivity Produkte von SiRF Technologies

Die theoretische Aufbereitung hat Wege gezeigt, GNSS-Signale auch in Indoor-Umgebungen empfangen zu können. Nun soll der Stand der Technik anhand einiger praktischer Tests mit einem am Markt verfügbaren Produkt aufgezeigt werden. Getestet wurde ein L1-Empfänger der Firma SiRF Technologies, die seit einiger Zeit Produkte im High Sensitivity-Segment anbietet. Das Evaluierungspaket umfasste neben dem Empfänger, der mit dem so genannten SiRFstarIIe/LP-Chip ausgestattet ist sowie einer aktiven Antenne die spezielle High Sensitivity-Software „XTrac“. Für die Akquisition schwacher Signale verwendet SiRF das Verfahren massiver Parallelkorrelation, wobei im speziellen Fall 1920 Korrelatoren implementiert sind. Im Lieferumfang ebenfalls enthalten ist eine Software SiRFDemo, die Navigationslösungen berechnet, Daten loggt und die Daten in Echtzeit visualisiert.

Der Empfänger wurde über eine serielle Schnittstelle mit einem PC bzw. Laptop verbunden, auf dem SiRFDemo installiert wurde. Eine weitere serielle Schnittstelle am Empfänger, die für den Input von DGPS-Korrekturdaten im RTCM-Modus vorbereitet ist, steht im High Sensitivity-Modus nicht zur Verfügung. Daher sind sämtliche Positionslösungen im Test Standalone-Lösungen.

Der erste Teil der Tests wurde in verschiedenen Indoor-Umgebungen, also unter „realen“ Bedingungen durchgeführt. Für den zweite Teil der Tests wurde der Empfänger im Labor direkt mit einem Signalgenerator verbunden. Diese simulierten Daten bieten eine bessere Abdeckung aller Signalstärkebereiche.

3.2 Reale Indoor-Testumgebungen

3.2.1 Signal-zu-Rauschverhältnis

Für die Messungen in realen Umgebungen wurden zunächst an vier verschiedenen Standpunkten Daten über eine längere Zeit (5-10 Stunden geloggt). Ziel dieser Messungen war es, das empfangene Signal-zu-Rauschverhältnis in Abhängigkeit von Azimut und Elevation zu untersuchen. Dieser Test sollte Erkenntnisse darüber bringen, in welchen Umgebungen noch an einen sinnvollen Einsatz des SiRFstarII- Receivers zu denken ist. Abbildung 2 veranschaulicht diese vier Umgebungen. Es ist zu beachten, dass es sich bei den vom Empfänger ausgehenden und den hier wiedergegebenen Signal-zu-Rauschverhältnissen immer um das C/N_0 handelt. Dies ist nicht mit den S/N aus Kapitel 2 zu verwechseln. Das C/N_0 bezeichnet die Stärke des Trägersignals im Verhältnis zum Rauschsignal normiert auf eine Zwischenfrequenzbandbreite von 1 Hz. Den mathematischen Zusammenhang zwischen C/N_0 und S/N_{ZF} beschreibt folgende Formel:

$$\frac{S}{N_{ZF}} = \sqrt{\frac{C}{N_0 B_{ZF}}} \quad (4)$$

Tabelle 1 fasst die gewählten Standorte zusammen und schätzt die a priori vermutete Schwierigkeit der gewählten Umgebung im Hinblick auf L-Band-Signalempfang grob ab. Bei der Umgebung 1 handelt es sich um ein von der Wand- und Deckentiefe wenig massives Gebäude, in dem jedoch Stahlträger und als Verkleidung viel Holz, Glas und Blech verwendet wurden. Im Deckenbereich befinden sich zwei Dachfenster. Bei den Umgebungen 2-4 handelt es sich um einen massiven Betonbau mit einem eher leichten Dachaufbau. Umgebung 2 befindet sich im Obergeschoss dieses Gebäudes, Umgebung 3 im Erdgeschoss und Umgebung 4 im äußeren Kellereingang.

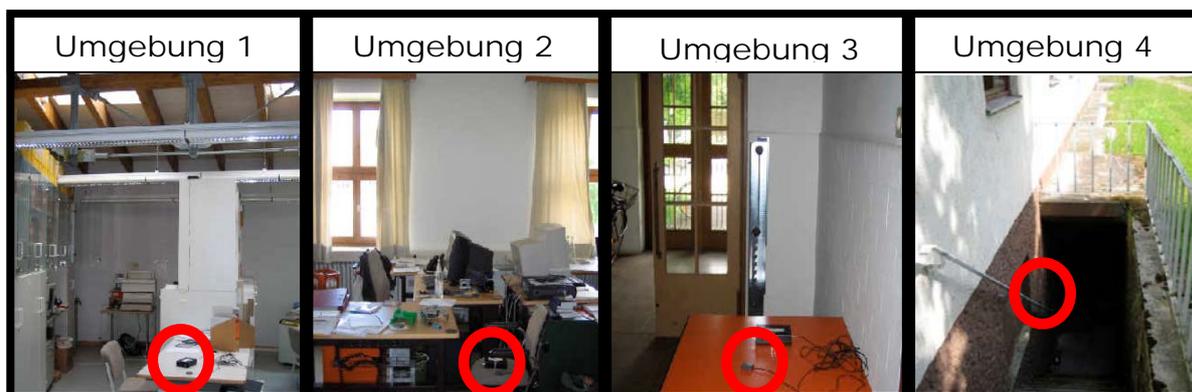


Abb. 2: Reale Indoor-Testumgebungen

Stockwerke über Punkt	Wände	Decke	Charakteristik	
Umgebung 1	0	Holz, Beton, Blech	Stahlträger, Holz und Glas	leicht
Umgebung 2	0	Beton	Holz, Putz und Dachpappe	leicht
Umgebung 3	1	Beton	Beton	schwierig
Umgebung 4	0-2	Beton	mehrere Betondecken	schwierig

Tab. 2: Kurzbeschreibung der Messstandorte

Abb. 3 stellt die tatsächlich erreichten Signal-zu-Rauschverhältnisse in Abhängigkeit von Azimut und Elevation dar. Für die azimuth- und elevationsabhängige Darstellung wurden Azimutbereiche zu je 20 Grad und Elevationsbereiche zu je fünf Grad zusammengefasst, so dass insgesamt $18 \times 18 = 324$ Felder entstanden. Zur besseren Verdeutlichung sind wichtige Strukturen der Indoor-Umgebung mit schwarzen Umrissen nachgezeichnet. Mit zunehmendem Signal-zu-Rauschverhältnis sind die Felder von türkis über grün, gelb, orange, rot bis rotbraun eingefärbt. Flächen mit tiefblauer Farbe weisen darauf hin, dass aus diesen Bereichen keine Satellitendaten vorliegen. Dies kann an einer zu großen Signaldämpfung der Umgebung liegen. Im Regelfall jedoch handelt es sich hier lediglich um Bereiche, die während der fünft- bis zehnstündigen Messdauer nicht durch einen Satellitenorbit abgedeckt wurden.

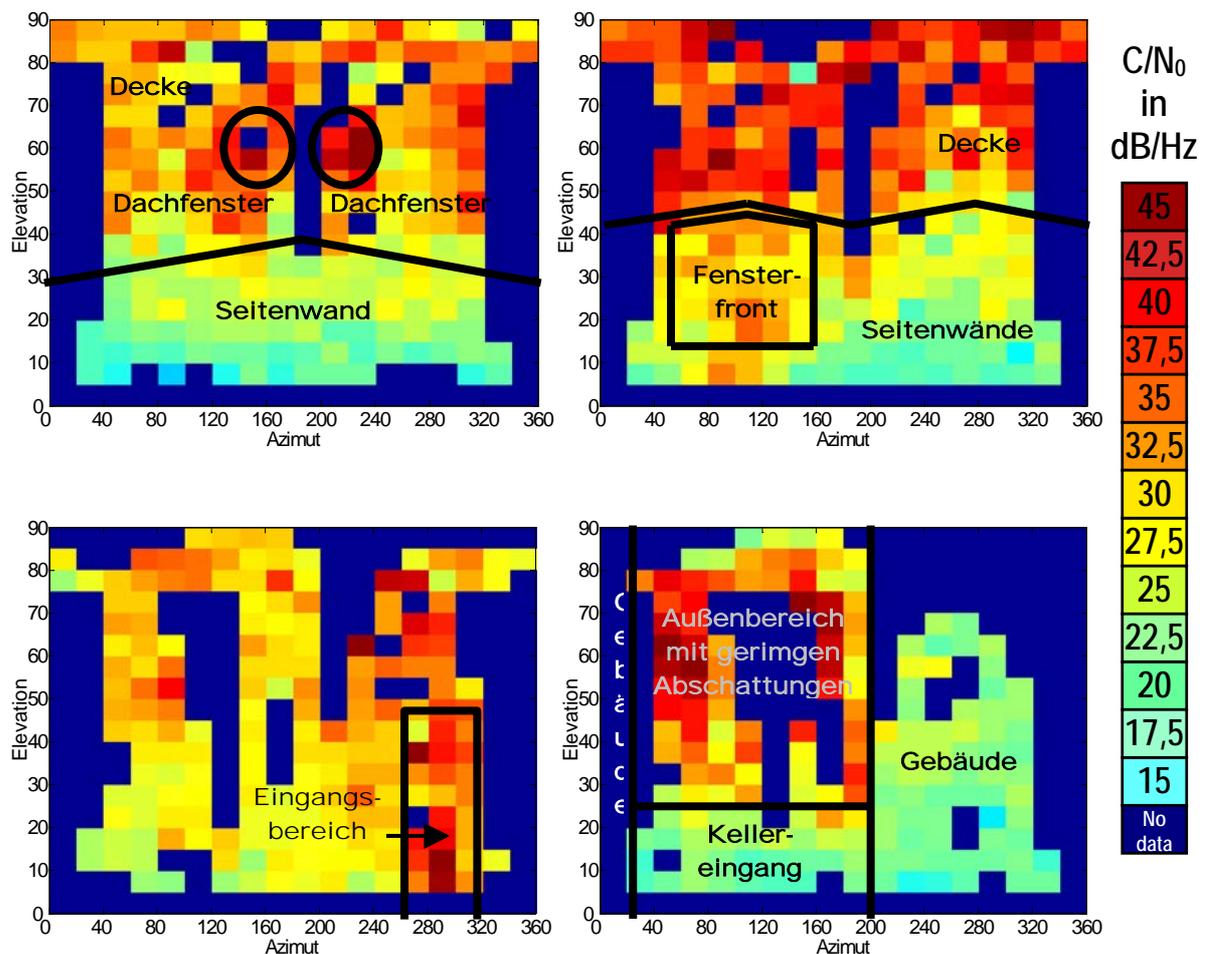


Abb. 3: Signal-zu-Rausch-Verhältnisse der vier untersuchten Umgebungen in Abhängigkeit von Azimut und Elevation

In der Umgebung 1 ist deutlich zu erkennen, dass die Dachkonstruktion für die Satellitensignale durchlässiger ist als die Seitenwand. Zwei relative „Hot Spots“ auf der Deckenfläche markieren zwei Luken aus Glas. Auch in der Umgebung 2 ist ein signifikanter Unterschied zwischen Elevationen bis ca. 45° bzw. darüber festzustellen. Allerdings bildet hier im wandseitigen Bereich eine Fensterfront im Bereich von ca. 50° bis 140° Azimut eine Ausnahme. Hier wurden deutlich höhere Signal-zu-Rauschverhältnisse registriert. Die Dachkonstruktion lässt durchweg hohe Empfangssignalstärken zu, da im Obergeschoss keine Betondecke vorhanden ist.

Umgebung 3 veranschaulicht Messungen im selben Gebäude wie Umgebung 2, allerdings einen Stockwerk tiefer. Durch die vorhandene Betondecke sind die Signal-zu-Rauschverhältnisse bei hohen Elevationen signifikant geringer. Die Antenne wurde jedoch in relativer Nähe zur Ausgangstür platziert. Deutlich ist dies bei Azimut 300° sichtbar. Hier finden sich hohe Signal-zu-Rauschverhältnisse bei geringer Elevation. Dass darüber hinaus diese bei geringen Elevationen höher sind als bei den übrigen Testumgebungen, ist jedoch nicht plausibel zu erklären. Umgebung 4 befand sich unmittelbar an einer Hauswand etwa einen Meter unterhalb des Erdbodenniveaus in einem Kellereingang. Zwischen 200° und 20° Azimut befand sich das komplette Gebäude in der Sichtlinie. Empfangene Signale haben entweder das komplette Gebäude passiert oder wurden als indirektes Signal durch ein direkt gegenüber liegendes hohes Gebäude, das als Reflektor fungierte, hineingespiegelt. Bei höheren Elevationen im Azimutbereich zwischen 20° und 200° waren nur geringe Abschattungen durch eine Überdachung sowie diverse Vegetation vorhanden, so dass hier die höchsten Empfangsstärken gemessen wurden.

Sämtlichen Tests zur Ermittlung der Signal-zu-Rauschverhältnisse ging ein Warmstart des Receivers sowie eine Einlaufphase von wenigen Minuten im Outdoor- oder Übergangsbereich voraus. Ohne diese anfängliche Hilfestellung wäre die Akquisition der Signale besonders in den Umgebungen 3 und 4 nicht gelungen. In Kap. 3.3 werden die erforderlichen Signal-zu-Rauschverhältnisse für Kalt- und Warmstarts näher untersucht.

3.2.2 Erreichte Genauigkeiten

Zur Ermittlung der erreichten Genauigkeiten wurden zunächst vier Punkte besetzt, deren WGS84-Koordinaten zuvor tachymetrisch bestimmt wurden. Drei der vier Punkte befanden sich innerhalb des Gebäudes der Umgebung 1, einer genau im Übergangsbereich zwischen Indoor- und Outdoor-Umgebung. Alle vier Punkte wurden anschließend mit dem SiRF-Receiver für je eine halbe Stunde besetzt. Die zum Lieferumfang gehörige Software erzeugt mit einer Rate von 1 Hz Echtzeit-Navigationslösungen. Abb. 4 fasst die Genauigkeiten der 3D-Navigationslösungen in Histogrammen zusammen, um einen Eindruck von der Verteilung der Einzellösungen zu bekommen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Zahl der groben Fehler auf einige wenige im Fall P1 beschränken. Ansonsten zeigen die Konturen alle Histogramme - bezogen auf den begrenzten Umfang der Stichprobe - eine recht gute Realisierung einer Chi-Quadrat-Verteilung, wie es für eine 3D-Koordinatenlösung zu erwarten ist. Die erreichten Genauigkeiten in Bezug auf die Sollkoordinaten für die 3D-Navigationslösungen sowie separat für ihre Lage- und Höhenkomponenten sind in Tab. 3 als Standardabweichungen zusammengefasst. Die 3D-Navigationslösung liegt bei etwa 20 m und damit mindestens um den Faktor zwei schlechter als die Genauigkeit, die gegenwärtig mit einem Standalone-GPS-Receiver im Outdoorbereich erzielt werden kann. Erkennbar am schlechtesten ist die Höhenkomponente. Dies überrascht nicht, steigert sich die Genauigkeit der Höhenkomponente doch mit zuverlässigen Messungen zu Satelliten niedriger Elevation. Schon Abb. 3 hat jedoch gezeigt, dass im Bereich niedrigerer Elevation nur stark gedämpfte Signale zu empfangen sind. Auffällig ist, dass trotz der unterschiedlichen Positionen der Messpunkte, die sich sukzessive in das Innere des Gebäudes vorschieben, keine signifikanten Unterschiede in der Genauigkeit

ergeben. Damit scheint das untersuchte Gebäude (Umgebung 1) nicht nur punktuell, sondern flächendeckend für den Indoor-GPS-Empfang mit dem SiRF-Receiver geeignet.

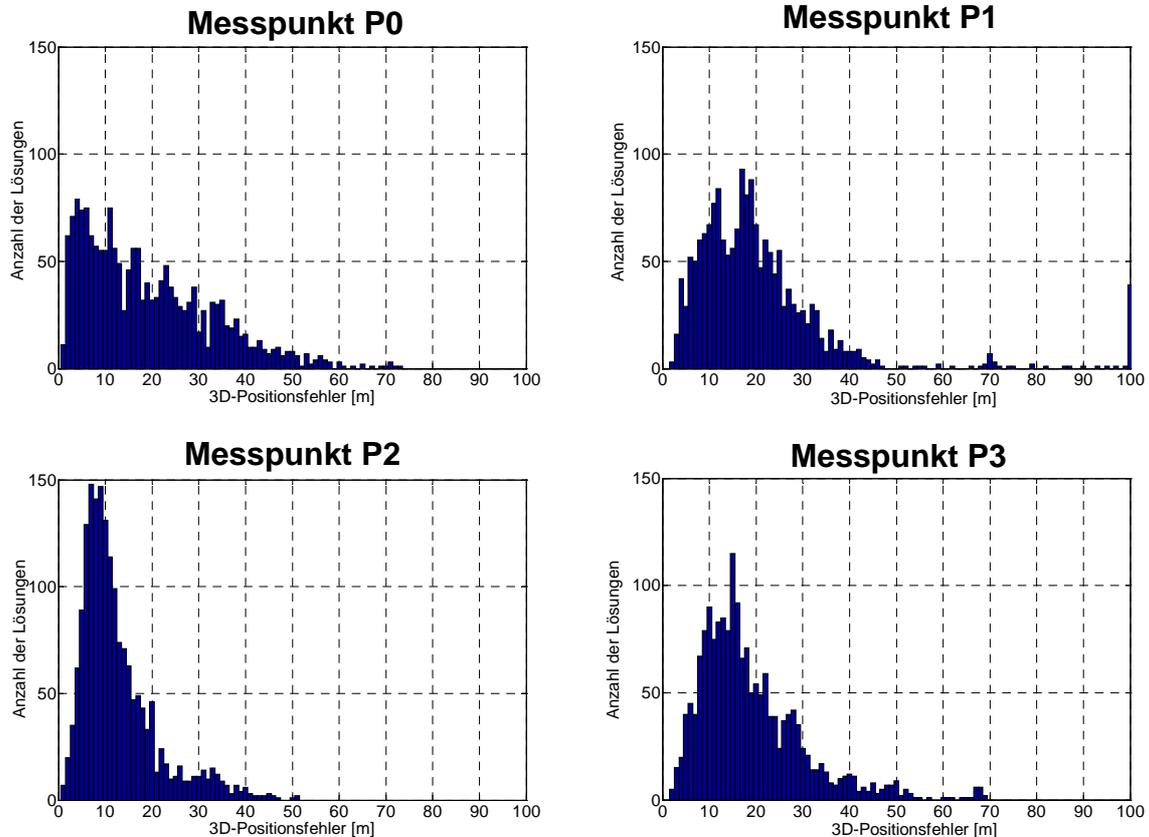


Abb. 4: Häufigkeitsdiagramme über die 3D-Positionsgenauigkeiten der vier Messpunkte in Umgebung 1

Messpunkt	3D [m]	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]
P0	23,46	8,69	5,39	20,88
P1	28,81	10,74	8,90	24,69
P2	15,19	5,99	5,01	12,69
P3	22,06	7,35	6,52	19,37

Tab. 3: Standardabweichungen der Navigationslösungen in Bezug zu den Sollkoordinaten

Schließlich wurden auch für die Umgebungen 2 bis 4 Genauigkeitsuntersuchungen vorgenommen. Hier lagen keine WGS-Koordinaten vor, so dass die berechneten Standardabweichungen die Wiederholgenauigkeit kennzeichnet. Tab. 4 gibt eine Übersicht über die erreichten Genauigkeiten. In Abb. 5 sind parallel zu Abb. 4 wieder die Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Hierbei wird erkennbar, dass die Situation im Erdgeschoss (Umgebung 3) noch etwas problematischer ist als im Kellereingang (Umgebung 4), wo zumindest von einem kleinen Himmelsausschnitt nur geringe Signaldämpfungen vorliegen. Auffällig ist jedoch, dass – GPS-unüblich – die Genauigkeit der geographischen Länge in der Umgebung 4 schlechter ist als die der geographischen Breite. Dies kann jedoch geometrisch dadurch erklärt werden, dass im speziellen Fall durch das Gebäude nur sehr schwache Signale zwischen 200° und

20° Azimut empfangen wurden, so dass ein Defizit an Signalen aus der kompletten westlichen Himmelshälfte besteht.

Messpunkt	3D [m]	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]
Umgebung 2	17,31	7,81	6,01	14,24
Umgebung 3	31,01	13,03	9,25	26,58
Umgebung 4	22,73	10,70	11,97	16,09

Tab. 4: Standardabweichungen der Navigationslösungen der Umgebungen 2 bis 4

Bezüglich der Häufigkeitsverteilungen liefert die Umgebung 2 aufgrund des unproblematischen Umfelds und des mit Abstand größten Stichprobenumfangs ein sehr glattes Bild. Ergänzend ist festzustellen, dass in Umgebung 3 in insgesamt 20% der Messepochen weniger als 4 Satelliten zur Verfügung standen, also gar keine 3D-Navigationslösung erzeugt wurde. In Umgebung 4 betrug dieser Anteil rund 18%. 0,3 % aller Navigationslösungen in Umgebung 3 blieben in der Auswertung von vornherein als grob falsche Lösungen unberücksichtigt. In den anderen Umgebungen kam es zu keinen groben Fehlern.

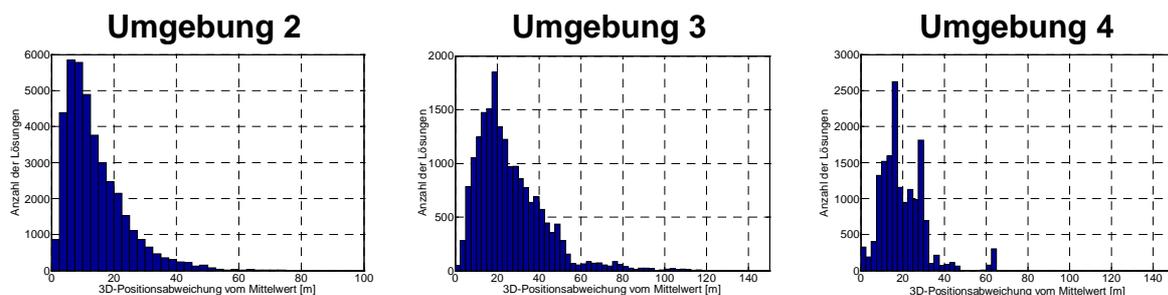


Abb. 5: Häufigkeitsdiagramme über die 3D-Positionsgenauigkeiten der Umgebungen 2 bis 4

3.3 Simulationen

3.3.1 Ablauf der Tests

Die Tests in den realen Indoor-Umgebungen vermitteln einen wichtigen Eindruck vom Potenzial aktueller High Sensitivity-Lösungen. Um jedoch die Grenzen, unter denen ein Signalempfang gerade noch möglich ist, auszuloten, wurde ein GPS-Signalgenerator direkt mit dem Antenneneingang des Empfängers verbunden, und es wurden Simulationen durchgeführt. Es kam ein Signalgenerator der Firma Spirent (Modell STR4760) zum Einsatz. Sämtliche Szenarien wurden mit der zugehörigen Software SimGEN konfiguriert und zum Teil als vorbereitete Batch-Dateien mit der Software SimREMOTE eingelesen.

Von einer hohen - etwa einer Outdoor-Umgebung entsprechenden - Signalstärke ausgehend, wurde in regelmäßigen Zeitabständen die Sendeleistung aller Satelliten jeweils um 1 dB verringert. Für jede Signalstärke wurden mindestens 5 Minuten lang Daten geloggt. Untersucht wurde das Empfängerverhalten sowohl beim Tracking als auch bei der Akquisition des Signals. Die Untersuchungen bezüglich des Akquisitionsverhaltens unterschieden sich wiederum zwischen Warmstarts und der massivsten Form eines Kaltstarts, so genannten Factory Resets.

Bei Warmstarts wird der interne Speicher des Empfängers nicht gelöscht, so dass wichtige Informationen wie zum Beispiel die Satellitenephemeriden bei einem Neustart verfügbar bleiben. Beim Factory Reset wird der interne Speicher komplett gelöscht. Der Empfänger muss ohne a-priori-Information die gesamte Hemisphäre nach GPS-Signalen absuchen. Ist der Zugang zu einem ersten Satelliten erfolgt, so wird dem Empfänger über dessen Navigationsnachricht, die die Ephemeriden sämtlicher Satelliten enthält, der Zugang zu den übrigen Satelliten erleichtert. Auch dieser Vorgang kann jedoch einige Zeit in Anspruch nehmen, da erst nach 12,5 Minuten eine komplette Navigationsnachricht übertragen ist.

Für die Untersuchungen zum Signal-Tracking wurde nach jeweils 5 Minuten die Sendesignalstärke um jeweils 1 dB verringert. Für die Untersuchungen zur Signalakquisition nach Warmstarts wurde nach jedem mindestens fünfminütigen Log-Zeitraum eine mindestens einminütige Pause, in der keine Signale ausgesandt wurden, eingebaut. Für die Untersuchungen zur Signalakquisition nach Factory Resets wurde zusätzlich während der Minute ohne Signalübertragung der interne Speicher des Empfängers gelöscht.

Aufgezeichnet wurden für alle Tests am Simulator das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu allen Satelliten, die Anzahl der Satelliten, die die SiRF-Software für die Navigationslösung verwendet, die Anzahl der insgesamt empfangenen Satelliten sowie die Genauigkeit der Navigationslösung.

Der blaue Graph in den Abb. 6-8 zeigt das am Testempfänger gemessene mittlere Signal-zu-Rauschverhältnis. Da in der Simulation keine Dämpfungseinflüsse aufgrund der Elevation oder des Antennendiagramms berücksichtigt wurden, sind die Signalstärken aller empfangener Satelliten näherungsweise gleich stark. Dies erlaubt es, die Signalstärken über alle Satelliten zu mitteln und dieses Mittel darzustellen. Das Signal-zu-Rauschverhältnis wird in den Abb. 6-8 drei Größen gegenübergestellt: In der oberen Teilgraphik der Anzahl der Satelliten, die für die Navigationslösung genutzt wurden, in der mittleren Teilgraphik der Anzahl der Satelliten, die insgesamt getrackt wurden und in der unteren Teilgraphik der erzielten 3D-Positionsgenauigkeit. Die x-Achse ist die Zeitachse. Für die Simulationen wurden Ephemeriden aus einer willkürlichen GPS-Woche ausgewählt.

3.3.2 Tracking

Bei der Signal-Tracking-Simulation wurde nach einer längeren Einlaufphase von Simulator und Empfänger das Ausgangssignal des Simulators im ersten Schritt massiv um rund 12 dB abgeschwächt. Dies diente der Beschleunigung des Messablaufs, zumal die bisherigen Erkenntnisse in diesem Messbereich keine Besonderheiten vermuten ließen. In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, dass die Signalstärke während der Einlaufphase in der Praxis in etwa einem ungestörten GPS-Signal in mittlerer Elevation entspräche. Es ist zu berücksichtigen, dass die tatsächliche Sendeleistung aktueller GPS-Satelliten etwa 10 dB höher liegt als in der Spezifikation nominell vorgesehen ist. Allen folgenden Angaben über Signaldämpfungen liegt die tatsächliche, etwa 10 dB über dem nominellen Wert liegende GPS-Signalstärke, im Folgenden Ausgangssignalstärke genannt, zu Grunde.

Abb. 6 zeigt erst bei einem Signal-zu-Rauschverhältnis von rund 24 dB/Hz, also nach 10 weiteren Absenkungen der Sendeleistung um jeweils 1 dB eine leichte Degenerierung der Genauigkeit, die zuvor über den gesamten Zeitraum konstant bei

ca. 5 m lag. Eine massive Verschlechterung der Genauigkeit auf Werte um 20-30 m ist dann bei einer Signalstärke von 22 dB/Hz zu verzeichnen. Dies ist auch der Zeitpunkt, an dem es zum teilweisen Ausfall erster Satelliten kommt. Davon ist allerdings zunächst lediglich die Navigationslösung betroffen. Programmseitig ist es nicht möglich, Navigationslösungen unter Beteiligung von Satelliten mit einem Signal-zu-Rauschverhältnis von kleiner als 20 dB/Hz zu erzeugen. Dieser Schwellwert wurde vom Hersteller definiert, um grob falsche Lösungen zu vermeiden. Die mittlere Graphik zeigt dagegen, dass die Satelliten trotzdem weiter getrackt werden. Der verfügbare Signalstärkebereich des verwendeten Simulators ist nach unten auf -30 dB der Ausgangsleistung beschränkt. Dieses Limit wird in Abb. 6 dadurch deutlich, dass sich der blaue Graph ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr weiter stufenweise der x-Achse nähert, sondern etwa bei 19 dB/Hz verweilt. Die mittlere Graphik zeigt, dass diese Begrenzung durch die zur Verfügung stehende Simulator-Hardware nicht ausreichend ist, um das untere Limit für das Signal-Tracking des SiRFstarII-Empfängers zu erreichen. Die Zahl der getrackten Satelliten nimmt zwar für diese Minimal-Signalstärke auf 8 ab und liegt damit um etwa 2 Satelliten niedriger als zu Beginn der Messreihe. Die vorangegangenen Testerfahrungen in realen Umgebungen haben jedoch gezeigt, dass eine Fortdauer des Signal-Trackings bis hinab zu 15 dB/Hz möglich ist.

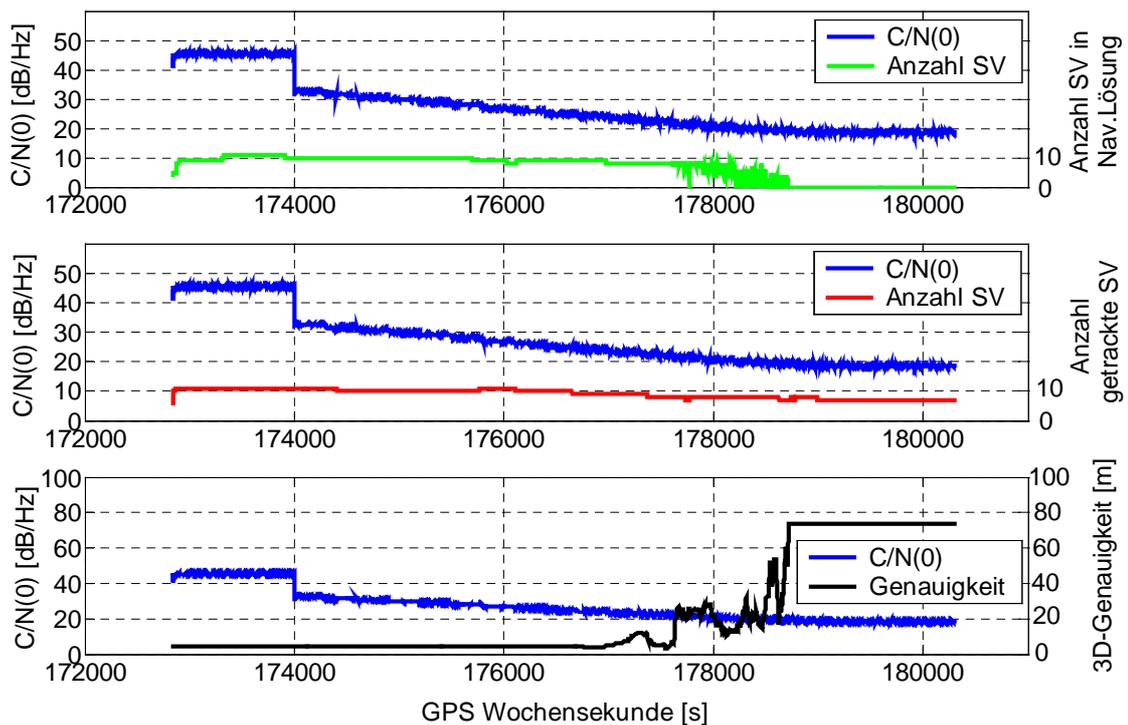


Abb. 6: Trackingperformance

Die Limitierung der Satelliten auf einen Signalstärkeschwellwert von 20 dB/Hz für eine Navigationslösung stellt sich als sinnvoll heraus, wie die deutlich schlechter werdenden Genauigkeiten in der unteren Teilgraphik belegen. Dass der Empfänger die Satelliten weiter tracken kann, ermöglicht ihre leichte Wiedereinbindung in die Navigationslösung, wenn der Schwellwert wieder überschritten wird, ohne dass re-akquiriert werden muss.

3.3.3 Akquisition

Abb. 7 zeigt adäquat zur Abb. 6 das Verhalten für die Signalakquisition nach einem Warmstart des Empfängers. Die Klüfte zwischen den Phasen gleicher Signalstärke markieren die in diesem Fall etwa dreiminütigen Phasen, in denen der Signalgenerator keine Signale ausgesandt hat. Es ist erkennbar, dass die erneute Berechnung einer Navigationslösung jeweils recht zügig erfolgt. Die Akquisition der Signale gelingt bis zu einer Signalstärke von etwa 20 dB/Hz, dies entspricht einer Signaldämpfung von 28 dB im Vergleich zum Ausgangssignal. Auf diesem Level ist ein fortdauerndes Tracking der Signale möglich, allerdings erzeugt die Software keine Navigationslösung mehr. Für Letzteres ist nach einem Warmstart eine Signalstärke von mindestens 24 dB/Hz nötig (Dämpfung 24 dB). Bereits bei 23 dB/Hz gelingt dies nur noch sporadisch für einzelne Epochen, was durch zusätzliche Tests bestätigt wurde. Die erreichten Genauigkeiten (untere Teilgraphik) liegen zwischen 5 und 20 m und sind zufällig verteilt, zeigen also keine Abhängigkeit von der Empfangssignalstärke.

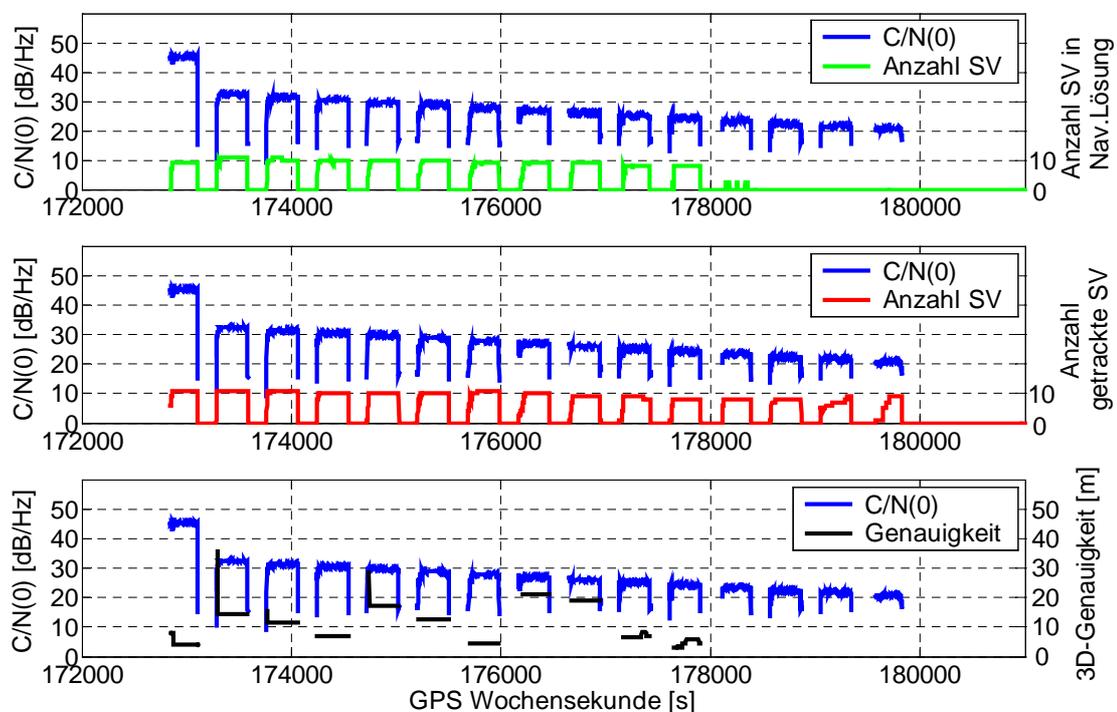


Abb. 7: Akquisitionsperformance nach Warmstarts

Abb. 8 zeigt die Situation der Signalakquisition nach Kaltstarts. Da mit einer verlängerten Akquisitionszeit zu rechnen ist, wurden die Zeiträume gleicher emittierter Signalstärke zwischen den Kaltstarts von 5 auf 8 Minuten ausgedehnt. Zwischen diesen Zeiträumen befindet sich jeweils nur eine Minute, in denen der Signalgenerator keine Signale ausgesandt hat. In diesen Zeiträumen fanden die Factory Resets statt. Es ist zu erkennen, dass die Akquisition nur mehr bis 31 dB/Hz gelingt, was einer Dämpfung von 17 dB im Vergleich zum Ausgangssignal entspricht. Bemerkenswerterweise verstreicht zwischen Factory Reset und Akquisition des ersten Satelliten nur sehr wenig Zeit. Dagegen verlängern sich die Zeiträume bis eine Navigationslösung generiert werden kann („Time to First Fix“ - TTFF) mit abnehmender Signalstärke zusehends. Die erreichten Genauigkeiten der Navigationslösungen bestätigen die Resultate der Warmstarttests insofern, als dass

sie keine Abhängigkeit von der Empfangssignalstärke aufweisen. Qualitativ liegen sie mit Werten kleiner 10 m sogar besser.

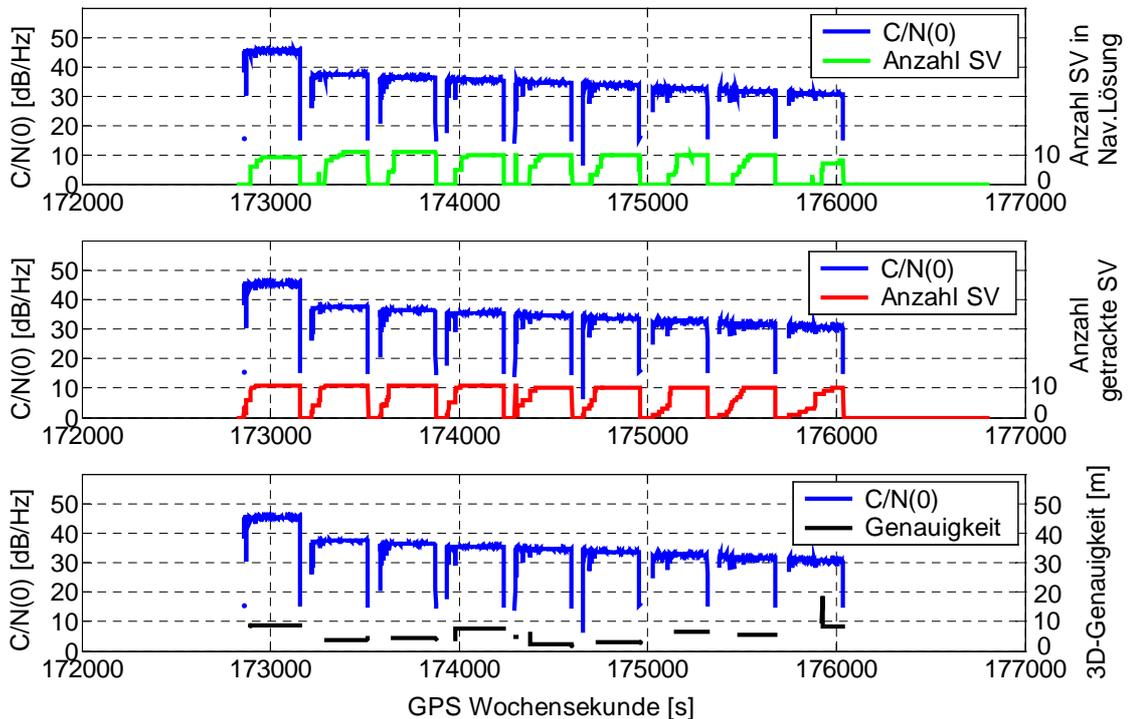


Abb. 8: Akquisitionsperformance nach Kaltstarts

Die „Time to First Fix“ (TTFF) ist ein wichtiges Kriterium, denn der Nutzer wird nur auf ein System bauen, das ihm zügig seine Position mitteilt. Abb. 9 zeigt die TTFF für Warmstart- und Kaltstartakquisitionen (durchgezogene Linien) in Abhängigkeit von der Empfangssignalstärke. Gut erkennbar ist, dass die Herstellerspezifikation von TTFF nach Kaltstart von unter 45 Sekunden bis zu einer Signaldämpfung von 14 dB unter der Ausgangssignalstärke weitestgehend eingehalten wird. Bei noch stärkeren Dämpfungen steigt die TTFF auf deutlich über eine Minute an, bis bei Dämpfungen von größer als 17 dB keine Navigationslösung innerhalb des vom Test zugelassenen Zeitraumes von 8 Minuten mehr gelingt. Unter Warmstartbedingungen liegt die TTFF bei 17 dB Signaldämpfung dagegen noch immer bei unter 10 Sekunden. Bei weiterer Dämpfung des Signals verläuft hier die Zunahme der TTFF flacher als unter Kaltstartbedingungen. Nur im Fall von 25 dB Dämpfung, der maximalen Dämpfung, unter der noch eine Navigationslösung gelingt, steigt die TTFF auf knapp über eine Minute.

Abb. 9 bestätigt auch noch einmal die Tatsache, dass zwischen Kaltstart und der Akquisition des ersten Satelliten (gestrichelte Linien) nur sehr wenig Zeit verstreicht - 14 Sekunden bilden hier das Maximum. Auch unter Warmstartbedingungen verlängert sich dieser Zeitraum erst, wenn die Signaldämpfung den maximalen Wert erreicht, unter dem überhaupt noch eine Akquisition möglich ist.

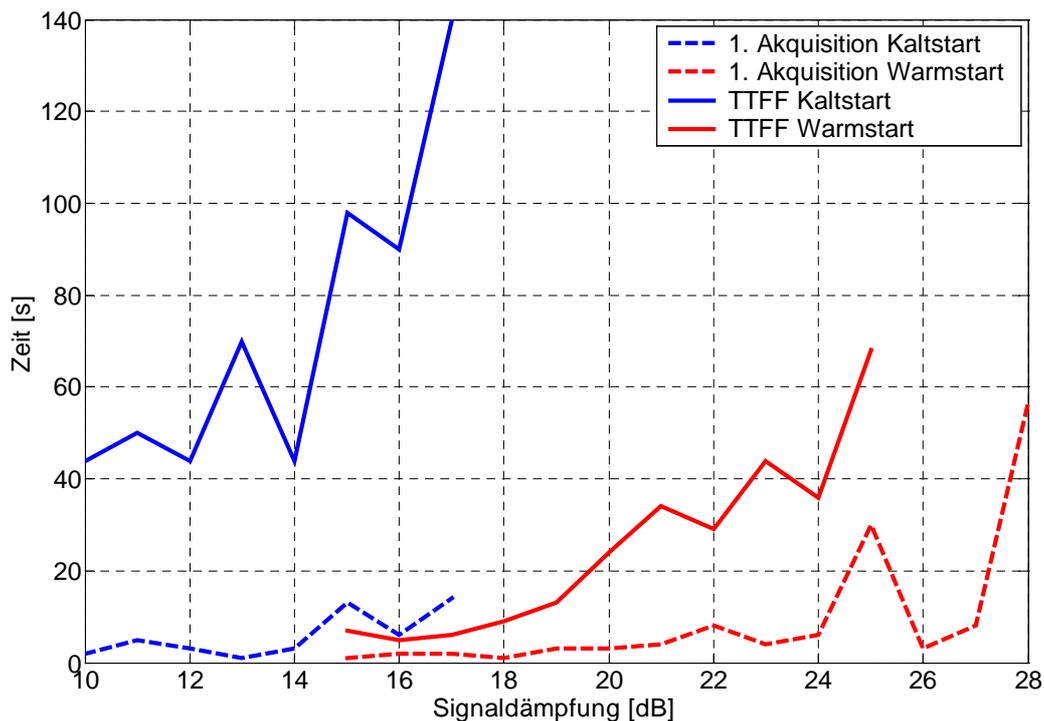


Abb. 9: Akquisitionszeit für den ersten Satelliten sowie TTFF für Kalt- und Warmstarts

4 Fazit

Die ausführlichen Tests zeigen, dass ein GPS-Empfang innerhalb von geschlossenen Räumen möglich ist. Es ist jedoch wichtig, zu unterscheiden, ob ein bereits vorhandenes Signal weiter getrackt werden soll oder ob die Akquisition der Signale - möglicherweise sogar nach einem Kaltstart - in geschlossenen Räumen erfolgen soll. Der Testempfänger ermöglicht ein Signal-Tracking noch bei 33 dB Signaldämpfung, die Akquisition nach Warmstart bei 28 dB Dämpfung und die Akquisition nach einem Kaltstart noch bei 17 dB Dämpfung. Das für den Nutzer wichtige Kriterium einer Navigationslösung gelingt entsprechend bei 28 dB, 25 dB bzw. 17 dB Dämpfung (Tab. 5).

Kriterium	max. Signaldämpfung in dB	
	mind. 1 Satellit	Navigationslösung
Tracking	33	28
Akquisition nach Warmstart	28	25
Akquisition nach Kaltstart	17	17

Tab. 5: Maximal mögliche Signaldämpfung für die Testkriterien

Ein Blick auf die erreichten Genauigkeiten verdeutlicht, dass zwischen ungestörtem Signalempfang und Indoor-Umgebungen noch eine große Kluft ist. Behält man zudem das Ziel, sich raumgenau navigieren zu wollen, im Auge, wird sich ohnehin Indoor-DGPS als unumgänglich erweisen. In welchem Maße sich die Satellitennavigation in äußerst problematischen Umgebungen wie etwa Tiefgaragen

als tauglich erweisen wird, wird sich erst zeigen, wenn weitere Fortschritte bei der Rechenleistung der Empfänger einerseits erzielt werden, und andererseits Assistenzfunktionen via Mobilfunk verfügbar sind. Synergien mit mobilen Funknetzen sind unübersehbar und sollten genutzt werden, zieht man in Betracht, dass großstädtische und damit für die Satellitennavigation problematischste Zonen durch den Mobilfunk am besten penetriert werden.

5 Referenzen

Michler, B., Strey, M., Untersuchungen zur DAB-Inhouse-Versorgung im L-Band, 43rd International Scientific Colloquium, Technical University of Ilmenau, September 1998

Peterson, B., Bruckner, D., Heye, Sh., Measuring GPS Signals Indoors, Proc. Of ION-GPS 1997, Part I, pp.615, Kansas City, Missouri

SiRFstarIIe/LP, Evaluation Kit User's Guide / Reference Manual, SiRF Technology, Inc., San Jose, California, February 2004

Stone, W. C., Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials, NIST Report 6055, National Institute of Standards, 1997, Gaithersburg, Maryland

Krasner, N.F., Marshall, G., Riley, W., Position Determination Using Hybrid GPS/Cellphone Ranging, Proc. of ION-GPS 2002, pp. 165, Portland, Oregon.

Van Diggelen, F., Global Locate Indoor GPS Chipset & Services, Proc. Of the ION-GPS 2001, Salt Lake City, Utah.

Van Diggelen, F., Abraham, Ch., Indoor GPS Technology, CTIA Wireless-Agenda, Dallas, May, 2001.