

Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Zentrum für Geoinformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„GNSS im Wald“ Grundlagenuntersuchungen zu Störfaktoren

vorgelegt von

Dr. Frank Thomas Purfürst
U1445, UNIGIS MSc Jahrgang 2009

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Tharandt, 24.09.2010

Diese Arbeit ist meiner Lebensgefährtin
für ihr Verständnis gewidmet.

Zusammenfassung

Die Positionsbestimmung mittels GNSS spielt auch im Wald eine entscheidende Rolle. Das Kronendach schränkt jedoch den Satellitenempfang auf dem Boden stark ein. Eine Vielzahl an Untersuchungen beschäftigte sich bereits mit der statischen und kinematischen Genauigkeit von Positionsbestimmungen im Wald. Eine quantitative und qualitative Ursachenforschung wurde jedoch meist unterlassen. Das Ziel vorliegender Untersuchung ist es, den Einfluss des Kronendaches und weiterer externer Faktoren auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern genauer zu erklären.

Um den Einfluss der Überschildung auf die Signalqualität zu untersuchen wurde je ein GPS-Empfänger in einem Fichtenbestand und in einem Buchenbestand installiert. Ein weiterer GPS-Empfänger diente oberhalb der Baumkrone auf einem 40 m hohen Messturm als Referenz. Es liegen ca. 100 Mill. Sekunden Positionsdaten und ca. 500 Mill. Satellitendaten über einen teilweise unterbrochenen Zeitraum von insgesamt drei Jahren vor. Darüber hinaus werden Wetterdaten sowie für die Bestimmung des Überschildungsgrades Kronenbilder als Einflussfaktoren untersucht.

Es konnte ein klarer Einfluss und Zusammenhang der Krone mit der Positionsqualität festgestellt werden. Anhand des Satelliten-Rausch-Verhältnisses kann die Abschirmung der Signale besonders für breite Baumstämme und für dichte Kronenkonzentrationen nachgewiesen werden. Elevationswinkel unter 30° weisen geringe Werte auf und werden daher selten für eine Positionsbestimmung verwendet. Somit stehen den überschilderten GNSS-Empfängern deutlich weniger Satelliten zur Verfügung, was sich wesentlich auf den PDOP und die Qualität der Positionsbestimmung auswirkt.

Generell ist die Positionsgenauigkeit im Fichtenbestand im Sommer etwas höher als im Buchenbestand, welcher einen hohen Überschildungsgrad aufweist. Im unbelaubten Zustand hingegen ändert sich die Situation und es wird im Buchenbestand eine um ca. 2 m verbesserte Genauigkeit erreicht.

Ein negativer Einfluss auf die Genauigkeit konnte durch Niederschlag nachgewiesen werden. Die Luftfeuchtigkeit und Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes scheinen keine Ursache für eine Veränderung der Qualität der Positionsbestimmung zu sein. Jedoch unterhalb von 0°C nimmt die Positionsgenauigkeit der GNSS-Empfänger erstaunlicherweise zu. Einen entscheidenden Einfluss hat auch der Wind. Dabei sinkt bei höheren Windgeschwindigkeiten die Präzision der Positionsmessung, die Richtigkeit hingegen steigt an. Beim unbelaubten Buchenbestand gilt dieser Zusammenhang allerdings nicht, da der Wind bei diesen Verhältnissen nur einen geringen Einfluss ausübt.

Summary

Determining correct positioning via GNSS in the forest presents a challenge, where the canopy cover limits receiving satellite data on the ground. A number of research has been done to evaluate the kinematic and static accuracy of GNSS positioning in the forest. However, fundamental qualitative and quantitative research is still lacking. The aim of this research is to evaluate the influence of the canopy and other external factors on the accuracy of GNSS receivers.

To evaluate the influence of canopy cover on GPS signal quality, GPS receivers were installed in a Spruce stand and a Beech stand. A further GPS receiver installed on a monitoring tower 40 m above the treetops to serve as a reference.

Approximately 100 million position data and approximately 500 million satellite data, collected over a partly interrupted period of three years is available. Additionally, the influences from weather data and of classification of degrees of canopy cover were investigated.

A clear influence and connection between the crown and the positioning quality could be established. On the basis of the satellite signal to noise ratio, signal shielding, particularly for wide tree trunks and dense cover concentration, can be proven. Elevations angles below 30 degrees prove of little value to positioning ascertainment, and are thus are seldom used for this purpose. Therefore satellite signals available for GNSS receivers under canopy cover is significantly less, which has a considerably effect on the PDOP and the quality of the determining of position.

In general, the positioning accuracy in spruce stand in summer was somewhat higher than in beech stand which have a higher degree of canopy cover. In leafless cover however, the situation changes and a 2 m improvement in accuracy are reached.

A negative influence of precipitation on the accuracy could also be proven. Air humidity and temperature above the freezing point appear to cause no changes to the quality of positioning accuracy. Surprisingly however, at temperatures below zero degrees the positioning accuracy actually increased. Wind also showed a deciding influence. While the precision of position measuring sank in high wind speeds, the accuracy in contrast increased. In leafless beech stand however, this interrelation did not apply, as the wind in this situation showed only limited influence.

Vorwort

Es war seit jeher der Wille des Menschen, Dinge zu erforschen und besser zu verstehen. In diesem Sinne soll auch diese Arbeit dazu dienen, den Praktikern, Wissenschaftlern, Studenten sowie Interessierten die Zusammenhänge von Mensch, Natur und Technik näher zu bringen.

Von verschiedenen Autoren und in verschiedenen Medien werden unterschiedliche Begriffsbestimmungen benutzt. Für das Verständnis einer Arbeit ist es darum wichtig, genau zu wissen wie ein Begriff definiert ist. Um den gemeinsamen Nenner mit dem Leser herzustellen, sind die Verweise zu Definition und Erklärungen mit ↗114 gekennzeichnet. Die Zahl gibt dabei die entsprechende Seite im Glossar an, auf der die Information zu finden ist. In vorliegendem Schriftstück werden alle Verweise als [blauer Text](#) dargestellt.

Ich möchte die Gelegenheit wahrnehmen dem gesamten UNIGIS-Team für die Betreuung während des Studiums zu danken.

Ein weiterer großer Dank gilt der Professur für Meteorologie der Technischen Universität Dresden, speziell Herrn Dr. Thomas Grünwald, ohne deren unbürokratische Bereitstellung der Wetterdaten und die Betreuung auf dem ökologischen Versuchsmessfeld, die vorliegende Arbeit kaum möglich gewesen wäre. Die Kollegin der Fachrichtung Geowissenschaften Ellen Schwalbe soll für die schnelle Klassifikation der Kronenbilder an dieser Stelle erwähnt werden.

Auch meinem Hund Asco soll Beachtung an dieser Stelle zu Teil werden, da er mich in vielen kritischen Situationen zu dem notwendigen „Auslauf“ gedrängt hat.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Lebensgefährtin Barbara Kurunczi bedanken, die mir auch in Zeiten großer Arbeitsbelastung verständnisvoll zur Seite stand und oft den Rücken frei gehalten hat.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Summary	iv
Vorwort	v
Inhaltsverzeichnis	viii
1 Einleitung	1
1.1 Problem	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufgabenstellung	3
1.4 Hypothesen	3
2 Stand des Wissens/Definitionen	4
2.1 Spezifikationen und Funktionsweise	4
2.2 Verwendete Genauigkeitsindikatoren	4
2.3 GNSS im Wald	8
2.3.1 Besondere Effekte des Waldes	8
2.3.2 Erreichte Genauigkeiten im Wald	12
2.3.2.1 Statische Genauigkeit	12
2.3.2.2 Kinematische Genauigkeit	13
2.3.2.3 Einflussfaktoren auf die Genauigkeit	15
3 Entwicklung einer Versuchsmethodik	21
3.1 GNSS-Empfänger	21
3.2 Untersuchungsgebiete	23
3.3 Versuchsanordnung	26
3.4 Datenerhebung	28
3.4.1 Übersicht	28
3.4.2 GPS-Datensätze	29
3.4.3 GPS-Datenaufzeichnung	29
3.4.4 Weitere verfügbare Daten	32
3.4.4.1 Wetterdaten	32
3.4.4.1.1 Luftbewegung	32
3.4.4.1.2 Temperatur	33

3.4.4.1.3	Luftfeuchte	33
3.4.4.1.4	Niederschlag	34
3.4.4.2	Überschirmung	35
4	Auswertungsmethodik	36
4.1	Daten-Aufbereitung	36
4.1.1	GPS-Daten	36
4.1.1.1	Verwendete Daten	36
4.1.1.1.1	Positionsdaten	36
4.1.1.1.2	Satellitendaten	37
4.1.1.2	NMEA-Parser	38
4.1.2	Wetter-Daten	39
4.1.3	Datenbank	40
4.1.3.1	Datenbankstruktur	40
4.1.3.2	Aggregation der Daten	40
4.1.3.3	Optimierung der Datenbank	42
4.1.3.4	Eingesetzte Hardware für die Daten-Aufbereitung und Analyse	43
4.1.4	Export von Daten	43
4.2	Analyse	44
4.2.1	Vorgehensweise	44
4.2.2	Statistische Kennwerte	44
4.2.3	Bewertungsindizes	46
4.2.4	Verwendete Software	47
4.2.5	Erstellung der Skyplots	48
4.2.5.1	2D-Skyplot	48
4.2.5.2	3D-Skyplot	50
4.2.6	Verbindung der Datenmengen	51
5	Ergebnisse	52
5.1	Verfügbare Messdaten	52
5.2	Positionsgenauigkeit der GPS-Empfänger	54
5.3	Empfangssituationen der Satelliten	59
5.4	Einfluss von externen Faktoren	64
5.4.1	Einfluss der Zeit	65
5.4.2	Einfluss der Satellitenverfügbarkeit	67
5.4.3	Einfluss der Überschirmung	68
5.4.4	Einfluss des Windes	75
5.4.5	Einfluss des Niederschlages	81
5.4.6	Einfluss der Luftfeuchte	83
5.4.7	Einfluss der Temperatur	85

6 Diskussion	88
6.1 Methodendiskussion	88
6.2 Verallgemeinerungsfähigkeit	90
6.3 Thesen	93
7 Schlussfolgerungen und Ausblick	95
Tabellenverzeichnis	97
Abbildungsverzeichnis	98
Formelverzeichnis	101
SQL-Anweisungsverzeichnis	102
Quellenverzeichnis	103
Glossar	112
A Versuchsflächen	119
B Externe Faktoren	123
C Positionsdaten	127
D Satellitendaten	131
E Genauigkeitsindikatoren	151
F Ausgewählte SQL Anweisungen	153
G Technische Spezifikationen	155
H Entwickelte Software	157

1 Einleitung

1.1 Problem

Die Globalen Navigations-Satellitensysteme (GNSS) [§113](#) sind bei der Positionsbestimmung und damit bei der Georeferenzierung von Sachdaten heutzutage nicht mehr wegzudenken. Hochentwickelte Empfänger und ausgeklügelte Korrektursysteme führen dabei zu sehr genauen Lokalisationen. Positionsgenauigkeiten im Zentimeter- teilweise sogar im Millimeterbereich sind dadurch möglich.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Ermittlung einer genauen Position ist, dass die Satellitensignale die GNSS-Antenne relativ ungestört und auf direktem Wege erreichen. Unter dem Kronendach eines Waldes ist dies allerdings nur eingeschränkt gegeben. Die Satellitensignale werden durch die Blätter, Äste und Stämme der Bäume adsorbiert, reflektiert und gebeugt, wobei die Bestimmung einer genauen, absoluten Position erschwert wird.

Anwendungen für den Einsatz von GNSS zur Positionsbestimmung im Wald bzw. Forstbereich sind dabei sehr zahlreich und werden besonders im Bereich der forstlichen Logistik ([KAMMERMEIER 2007](#); [KAUL 2007](#); [PURFÜRST 2002](#); [ERLER ET AL. 2004b](#)), bei der Etablierung von Rettungsketten im Wald ([SCHMIDT-BAUM 2008](#)), der Flächenvermessung ([LOOSE & ZANDER 2005](#)) sowie bei der Punktevermessungen z. B. für permanente Stichprobenpunkte der Landes- und Bundes-Waldinventur ([SCHWITZGEBEL ET AL. 2009](#)), eingesetzt. Auch die Dokumentation der Befahrung ([ERLER ET AL. 2004a](#); [TAYLOR ET AL. 2001](#)) und damit verbundene Verdichtungs- und Befahrungsanalysen von selbstfahrenden forstlichen Arbeitsmaschinen ([CORDERA ET AL. 2006](#); [PURFÜRST ET AL. 2007](#); [TAYLOR ET AL. 2001](#)) stützen sich auf GNSS.

Der Anspruch der Forstwirtschaft in Bezug auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Messungen ist, im Vergleich mit anderen Wirtschaftsbereichen, meist wesentlich geringer. So fordern [ERLER \(2008\)](#) und [PURFÜRST ET AL. \(2007\)](#) eine Genauigkeit im Submeterbereich bei der kinematischen Positionsverfolgung [§114](#) von Forstmaschinen. [SCHREIBER \(2009\)](#) präzisiert dies auf eine halbe Reifenbreite (35 cm). Auch für statische Messungen [§117](#) in der Forstwirtschaft reicht für diese Fragestellung eine Genauigkeit von einem Meter im Submeterbereich aus. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen bestätigen jedoch, dass diese geforderten Ansprüche an die Positionsbestimmung meist nicht erreicht werden. Daher ist der alleinige Einsatz von GNSS zur Positionsbestimmung für einen Großteil forstlicher Fragestellungen nicht ausreichend.

Spezielle Anwendungen, die eine sehr hohe Anforderung an die Position stellen, sind durch die Verringerung der Positionsgenauigkeit durch die Baumkrone oft nicht anwendbar bzw. unterliegen starken Einschränkungen. Dazu gehören unter anderem die automatische Inventur von Waldgebieten durch Harvester (MILLIGAN 2003; MURPHY ET AL. 2006), die korrekte Navigation selbstfahrender Arbeitsmaschinen (HAMBERGER 2001; HOLLEY 2001; HÜCKEL 2007; ROSSMANN ET AL. 2009), die autonome Steuerung von Forstmaschinen (HELLSTRÖM ET AL. 2009; RINGDAHL & HELLSTRÖM 2008) sowie die Erstellung von automatischen GNSS-unterstützten Zeitstudien (DE OLIVEIRA 2004; POLACZEK 1999; TAYLOR ET AL. 2001).

Eine Vielzahl von Untersuchungen zu den erreichten Genauigkeiten von GNSS im Wald wurden bisher durchgeführt. Flächendeckend kann dabei von einer maximalen Genauigkeit zwischen 3-4 m gerechnet werden (BÖHME 2010; PURFÜRST & ERLER 2007; PURFÜRST ET AL. 2007, 2010), wobei auch Submetergenauigkeit erreicht werden kann (ERLER ET AL. 2004a; NAUMANN ET AL. 2003). Bei kinematischer Messung ≈ 114 können sich diese Genauigkeiten noch stark verringern (DABRINGHAUS 2007). Eine Verallgemeinerung von Genauigkeitsangaben ist im Wald, besonders in strukturierten Beständen, durch die Inhomogenität der Umgebung sehr kritisch zu betrachten.

Konkrete Ursachenforschung bzw. die quantitative Ermittlung von Einflussfaktoren auf die Genauigkeitsverringerng wurde bisher nur in sehr geringem Umfang durchgeführt. Meist werden Vermutungen zu qualitativen Einflussgrößen getroffen. Genauere Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Umwelt-Parameter, wie Wind, Temperatur und Niederschlag, auf die Positionsgenauigkeit stehen jedoch aus. Diese sind für verschiedene Anwendungsfälle, wie z. B. der Kombination von GNSS mit Inertialsensorik mittels Kalman-Filter (GILLET ET AL. 2001; PURFÜRST ET AL. 2007), unabdingbar. Diese Wissenslücke soll mit der vorliegenden Arbeit zum Teil geschlossen werden. Eine genauere Bewertung der Güte der GNSS-Signalauswertung wird somit möglich. Die Ergebnisse können z. B. in Optimierungsalgorithmen einfließen und die Ergebnisse der Positionsbestimmung verbessern.

1.2 Zielsetzung

Ziel vorliegender Untersuchung ist es, den Einfluss des Waldes auf die Signalqualität von GNSS-Empfängern und damit auf die Positionsgenauigkeit zu erklären.

1.3 Aufgabenstellung

Es ist eine Versuchsmethode zu entwickeln, auf deren Grundlage es möglich ist, quantitative und qualitative Aussagen über den Einfluss der Bäume auf die GNSS-Genauigkeit und die GNSS-Verfügbarkeit im Allgemeinen und in Abhängigkeit von weiteren Umweltdaten zu treffen. Dabei sind exemplarische, empirische Messungen durchzuführen.

1.4 Hypothesen

Um die Ziele der Arbeit zu erreichen, werden sieben Arbeitshypothesen aufgestellt:

1. Der Wald hat Einfluss auf die Qualität der GNSS-Positionsbestimmung.
2. Es gibt Unterschiede in der Positionsgenauigkeit zwischen Laub- und Nadelholzbeständen.
3. Die Positionsgenauigkeit in Laubholzbeständen ist im belaubten Zustand geringer als im unbelaubten Zustand.
4. Bei hoher Luftfeuchte verschlechtert sich die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern im Wald.
5. Bei Niederschlag verschlechtert sich die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern im Wald.
6. Bei Wind verschlechtert sich die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern im Wald.
7. Die Temperatur hat einen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern im Wald.

2 Stand des Wissens/Definitionen

2.1 Spezifikationen und Funktionsweise

Bei der Satelliten-Positionsbestimmung wird umgangssprachlich meist von GPS [114](#) gesprochen. Dies muss an dieser Stelle allerdings näher spezifiziert und zwischen mehreren Satelliten-Positionierungssystemen unterschieden werden. Sie werden zusammen unter dem Kürzel GNSS [113](#) zusammengefasst. Die relevantesten sind:

- GPS NAVSTAR [114](#) - das amerikanische Satellitensystem,
- GLONASS [113](#) - das russische Satellitensystem,
- GALILEO [113](#) - das europäische Satellitensystem.

Wenn im folgenden von GPS gesprochen wird, so ist damit explizit das amerikanische GPS NAVSTAR gemeint. Anderenfalls wird der Begriff GNSS verwendet. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wird sich jedoch fast ausschließlich auf GPS NAVSTAR konzentriert werden.

Auf die Funktionsweise von GNSS, im Besonderen GPS, soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Dieses Wissen wird vom Leser vorausgesetzt. Es existieren zahlreiche Veröffentlichungen zu diesem Thema. Besonders soll auf [BAUER \(2003\)](#), [GEOSYSTEMS \(1999\)](#), [GREGORY \(1996\)](#) und [GREIFENEDER \(2005\)](#) verwiesen werden. Auf die spezifischen Besonderheiten, welche vorliegende Arbeit betreffen, wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen. Dazu gehören besonders die Eigenschaften und Einflüsse des Waldes.

2.2 Verwendete Genauigkeitsindikatoren

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung auf der Basis von Satellitensignalen wird über Indikatoren angegeben. Dabei ist zwischen direkten und indirekten Indikatoren zu unterscheiden, wobei nur die Abweichung von der tatsächlichen Position als direkter Indikator verwendet werden kann. Diese tatsächliche Position ist in den meisten Fällen jedoch nicht bekannt bzw. genau diese soll mithilfe des Verfahrens ermittelt werden. Somit werden stark mit der Positionsgenauigkeit korrelierende indirekte Indikatoren für eine Bewertung der Genauigkeit herangezogen. Im Folgenden werden einige dieser verwendeten Indikatoren zum weiteren Verständnis der Arbeit näher dargestellt.

Satellitenanzahl

Ein wichtiger Indikator für die Schätzung der Positionsgenauigkeit ist die Satellitenanzahl. Dabei wird zwischen der theoretisch zum Zeitpunkt der Messung sichtbaren („Satellites in view“) und der tatsächlich für die Positionsbestimmung verwendeten Satelliten („Satellites in track“) unterschieden. Grundsätzlich gilt, je mehr Satelliten für eine Positionsbestimmung verwendet werden desto besser ist die Genauigkeit.

DOP-Werte

Es kommt jedoch nicht nur auf die Anzahl der Satelliten an, sondern auch auf ihre Verteilung am Horizont. Die DOP-Werte („Dilution of Precision“) beschreiben die Verringerung der Genauigkeit durch die Konstellation der zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten („Satellites in track“). Die GNSS-Empfänger geben drei DOP-Werte aus: den HDOP [114](#), den VDOP [117](#) und den PDOP [115](#). Ergänzend dazu werden noch die Zeitgenauigkeit der Satellitenuhren (Time DOP, TDOP [117](#)) und die Gesamtgenauigkeit (Geometric DOP, GDOP [113](#)) angegeben. Die DOP-Werte korrelieren sehr stark mit der Streuung der gemessenen Positionswerte.

Die größte Bedeutung kommt dem „Positional DOP“ (PDOP) zu, der die 3D-Positionsgenauigkeit darstellt. Der Wert ist dabei indirekt proportional zum Volumen der durch den Empfänger und die Satelliten gebildeten Pyramide. Dabei bedeuten kleinere Werte eine Erhöhung der Genauigkeit. Optimal ist ein Wert von eins. Werte größer 10 gelten als sehr ungünstig. Abbildung 2.1 stellt zwei Extreme der Satellitenverteilung dar.

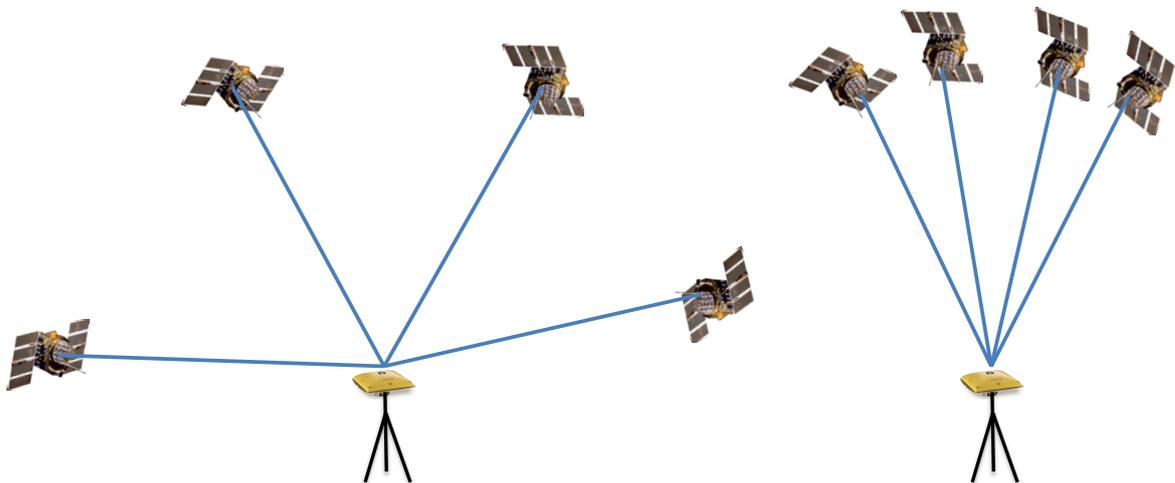


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des PDOP: niedrig (links) und hoch (rechts)

Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)

Neben der Anzahl und der Verteilung der Satelliten am Himmel ist die Stärke der empfangenen Satellitensignale ein weiterer wichtiger Indikator. Diese wird durch das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) §116 angegeben und berechnet sich aus dem Verhältnis der mittleren Leistung des Nutzsignals zur mittleren Rauschleistung des Störsignals der gleichen Signalquelle. Die Einheit ist dB §112. Ein Signal-Rausch-Verhältnis von Null bedeutet, dass keine Signale des Satelliten ausgewertet werden. Vorkommende Werte für „Satellites in view“ sind Verhältnisse von 30 dB (mäßig) bis 50 dB (gut).

$$SNR_{dB} = 10 \lg \left(\frac{P_N}{P_S} \right)$$

SNR_{dB}	Signal-Rausch-Verhältnis in dB
P_N	Leistung des Nutzsignals
P_S	Leistung der Störsignale

Formel 2.1: Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses

Korrektur der Position

Die Satellitensignale durchlaufen die Atmosphäre, welche sich zeitlich verändert. Dabei kommt es zu Laufzeitunterschieden die unbekannt sind. Darüber hinaus existiert keine Information über die Zuverlässigkeit des verwendeten Signals. Daher ist ein weiterer wesentlicher Indikator die Information, ob und wenn ja welches Korrektursignal verwendet wird. Die Verwendung eines Korrektursignals wird durch das Präfix „D“ ausgedrückt, wobei folglich von DGPS §113 bzw. DGNSS §113 gesprochen wird. Die Korrektursignale liefern quantitative Informationen über die Einflüsse der verschiedenen Sphären (im Besonderen der Ionosphäre) auf die Laufzeiten der Signale sowie teilweise über die Integrität der GNSS-Systeme. Durch die Korrektur sind erheblich genauere und verlässlichere Positionsbestimmungen möglich.

Es gibt eine Vielzahl an Korrekturmöglichkeiten. Die wichtigsten sind:

- **SAPOS** §116 und **ASCOS** §112 stellen Echtzeit-Korrekturdaten innerhalb Deutschlands per Internet zur Verfügung.
- **BEACON** ist ein kostenloser Korrekturdienst, der für die Binnenschifffahrt entwickelt wurde.
- **EGNOS** §113 („European Geostationary Navigation Overlay Service“) ist ein satellitengestütztes monodirektionales Referenz- und Überwachungssystem, welches Korrektursignale über Satellit sendet. Der geostationäre Satellit setzt eine freie Sicht nach Süden voraus.
- **Post-processing** beschreibt ein Verfahren zur zeitlich entkoppelten, nachträglichen Korrektur der aufgezeichneten Werte.

Positionsfehler-EPE

Ein Indikator für die Präzision [116](#) und im geringen Umfang auch für die Richtigkeit [116](#) ist der EPE-Fehler [113](#) („Estimated Positional Error“). Dieser schätzt die Positionsgenauigkeit mithilfe verschiedener Kennwerte u. a. aus den DOP-Werten und der Qualität der Satellitensignale. Daraus lassen sich drei verwendete Indikatoren ableiten:

- **H-Error** Horizontaler Fehler (HPE),
- **V-Error** Vertikaler Fehler (VPE),
- **P-Error** Positionsfehler (EPE).

Die Berechnung des EPE beschreibt die Formel [2.2b](#). Er wird herstellerspezifisch unterschiedlich berechnet. Der EPE-Fehler, der von der Firma Garmin verwendet wird, ist eigentlich komplexer aufgebaut als dies in der Formeln [2.2](#) dargestellt ist. Die Originalberechnung, welche wesentlich mehr Einflussparameter verwendet, wird jedoch aus Gründen des Wettbewerbs nicht veröffentlicht ([GARMIN 2010](#)), so dass die wahre Berechnung nicht eindeutig nachvollzogen werden kann. Er soll allerdings trotzdem in vorliegender Arbeit verwendet werden.

Sowohl bei den EPE [113](#) als auch bei HPE [114](#) und VPE [117](#) kann zwischen verschiedenen Fehlerwerten unterschieden werden (siehe Formel [2.2a-c](#)). Die verwendeten Positionsfehler beschreiben, wenn dies nicht explizit anders angegeben wird, den 68%-Wert, wobei geschätzt 68 % aller Messwerte innerhalb des Fehlerwertes (Konfidenzkreis für VPE und HPE, Konfidenzkugel für EPE) liegen ([MEHAFFEY 2010](#); [WORMLEY 2010](#)).

$$EPE_{50\%} = HDOP * URA_{1-\sigma} * 0,73 \quad (2.2a)$$

$$EPE_{68\%} = HDOP * URA_{1-\sigma} \quad (2.2b)$$

$$EPE_{95\%} = HDOP * URA_{1-\sigma} * 2 \quad (2.2c)$$

$EPE_{50\%}, EPE_{68\%}, EPE_{95\%}$ Geschätzte Fehler (EPE) welcher 50%, 68%, 95 % aller Werte beinhaltet
 $URA_{1-\sigma}$ User Range Accuracy [117](#)

Formel 2.2: Grundlegende Berechnung verschiedener EPE-Fehler nach [MEHAFFEY \(2010\)](#)

Positionsfehler-Standardabweichung

Als weiterer Indikator für die Positionsgenauigkeit wird, je nach Auswertungsfall separat, die Standardabweichung aller gemessenen absoluten Satelliten-Positionswerte gebildet.

Absolute Abweichung

Als einziger direkter Indikator dient die Entfernung zwischen der gemessenen Position und der tatsächlichen Position. Diese wird für Hoch- und Rechtswert getrennt oder im Betrag der Kombination beider (ΔPos) angegeben.

2.3 GNSS im Wald

2.3.1 Besondere Effekte des Waldes

Der Wald mit seinen bis zu 40 m hohen Bäumen nimmt beim Satellitenempfang eine Sonderstellung ein. Durch verschiedene Effekte kommt es zu Einschränkungen bei der Auswertung der Satellitensignale. Es treten im Wald spezifische Anforderungen und Voraussetzungen an die Positionsbestimmung auf. Zahlreiche Autoren haben dies in der Literatur beschrieben (DABRINGHAUS 2007; HAMBERGER 2001; HÜCKEL 2003; POLACZEK 1999; PURFÜRST 2002; ZIMMERMANN 1997, u. a.).

Auf die drei relevantesten, die Positionsbestimmung beeinflussenden, grundlegenden Effekte soll an dieser Stelle etwas näher eingegangen werden.

Multipath-/Mehrwegeeffekt

Der Multipath-Effekt [☞115](#), welcher auch als Mehrwegeeffekt bezeichnet wird, beschreibt ein Phänomen, bei dem die Satellitensignale an Objekten reflektiert werden und den Empfänger somit indirekt erreichen. Dies kommt besonders an Häusern aber auch an Bäumen vor. Dabei werden die Satellitensignale an der Oberfläche, besonders aber durch die L1-Frequenz [☞114](#) von 1575,42 MHz bedingt, am Wasser in den Blättern bzw. Nadeln reflektiert. Es wird vermutet, dass die Auswirkung des Multipath-Effektes an Waldbäumen stark vom Wassergehalt der Bäume, der Baumart (Nadeloberfläche und -verteilung) sowie vom Wassergehalt auf den Blättern/Nadeln abhängig ist. In der Literatur sind jedoch wenig Untersuchungen über die Ursachen dieses Phänomens zu finden (GEOSYSTEMS 1999; HAMBERGER 2001). Abbildung 2.2 stellt die Funktionsweise des Multipath-Effektes im Wald schematisch dar.

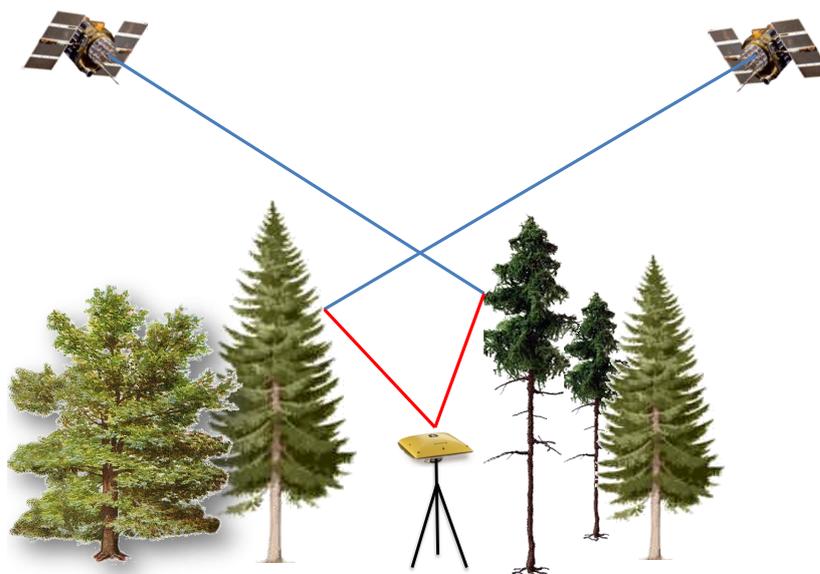


Abbildung 2.2: Multipath-Effekt durch die Bäume

Das reflektierte Signal erreicht nach der Reflektion den Empfänger auf einem längeren Weg mit einer höheren Signal-Laufzeit [116](#). Dadurch, dass die Positionen auf Grundlage der Laufzeiten der Satellitensignale ermittelt werden, kann dieser Fehler zu einer Verfälschung (meist Verschlechterung) der berechneten Position führen. Mit Hilfe von speziellen, polarisierten Antennen kann dieser Effekt verringert werden ([KÖHNE & WÖSSNER 2010](#)).

Abschirmung und Satellitenverteilung

Ein wesentlicher Effekt ist die Abschirmung der Satellitensignale durch die Blätter und Nadeln. Das Kronendach verhindert somit, dass die Signale den Empfänger in ausreichender Qualität erreichen und somit zur Positionsbildung verwendet werden können. [Abbildung 2.3](#) stellt dies schematisch dar.

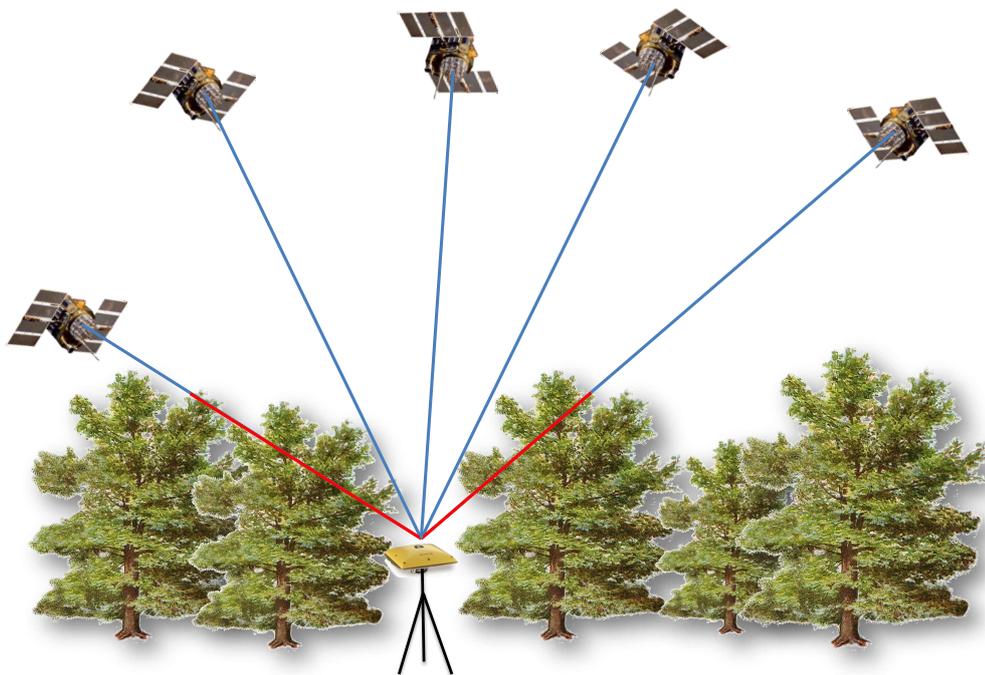


Abbildung 2.3: Abschirmungs-Effekt durch die Bäume

Die Störung des Satellitenempfangs durch den Waldbestand geschieht allerdings nicht bei jedem Winkel gleichwertig. Wenn von einem homogenen Waldbestand mit homogenem vollbekrontem Kronendach im ebenen Gelände ausgegangen wird, spielt der Elevationswinkel eine entscheidende Rolle für die Strecke, die das Signal theoretisch durch das Kronendach zu überwinden hat. [Abbildung 2.4](#) stellt dabei die Signalwege bei unterschiedlichen Elevationswinkeln und unterschiedlichen Bestandeshöhen dar. Deutlich wird die exponentielle Steigerung ab einem Elevationswinkel von ca. 15° .

Wird dabei noch die Erdkrümmung berücksichtigt, ist die Laufzeit beim Elevationswinkel von 0° und 5 m Bestandeshöhe auf 3,4 km gedeckelt. Bei einer Bestandeshöhe von 20 m beträgt der Signalweg durch den Bestand bereits 13,5 km.

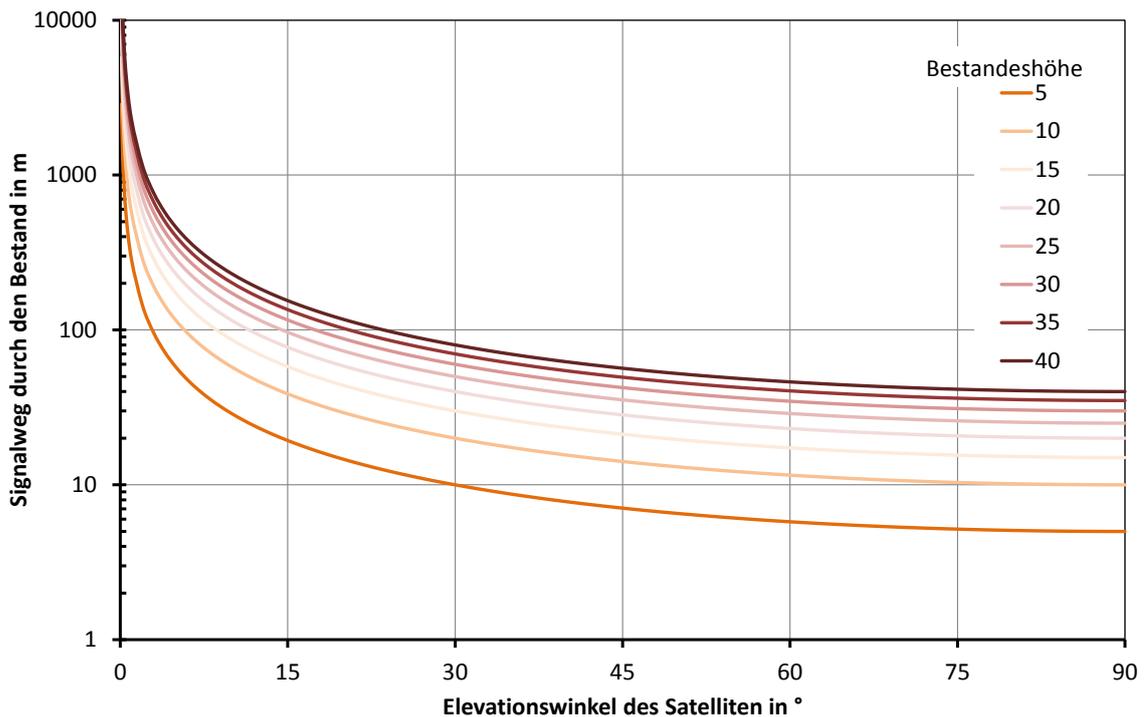


Abbildung 2.4: Theoretischer Bestandes-Signaldurchlauf in Abhängigkeit vom Elevationswinkel

In der Praxis kann nicht von einem homogenen Bestand ausgegangen werden. Wie die Baumkronenbilder A.2 bis A.6 zeigen, weisen die Bestände Lücken auf, die aufgrund der Signalwege umso deutlicher in Erscheinung treten, je größer der Elevationswinkel ist. Darüber hinaus sind die Bäume nicht zu 100 % bekrönt, sondern weisen ein Kronenprozent von ca. 40 % im Fichtenbestand auf. Dies führt dazu, dass die Signale bei geringem Elevationswinkel durch den Bestand zwischen den Baumstämmen empfangen werden (siehe Abbildung D.4). Begünstigt wird dies durch eine horizontale inhomogene Abfolge verschiedener Bestandesstrukturen, die in den Nachbarbeständen auftreten.

Einen entscheidenden Faktor stellt die Antennenhöhe dar (HAMBERGER 2001; SAKAI ET AL. 2006). Für ein vertiefendes Verständnis sei auf KOH & SARABANDI (2002a), die diese Wald-Situation theoretisch berechnet haben, verwiesen.

Durch die Verlängerung des Signalweges durch die Kronen weisen Satelliten mit einem hohen Elevationswinkel ein günstigeres Signal-Rausch-Verhältnis auf und werden daher verstärkt zur Berechnung der GNSS-Position verwendet. Diese Konzentration zenitnaher Satelliten führt jedoch wiederum zu ungünstigen räumlichen Konstellationen (PDOP \approx 115) der zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten. Dies zieht eine Verschlechterung der Genauigkeit nach sich.

Korrektursignal

Ein weiterer Effekt ist die Abschirmung des Waldes von Korrektursignalen und führt dazu, dass kein Korrektursignal flächendeckend im Wald vorhanden ist (PURFÜRST ET AL. 2007; HÜCKEL 2007). Das Korrektursignal des Satellitendienstes EGNOS  ist zwar flächendeckend vorhanden, wird aber selten empfangen, da der geostationäre Satellit geringe Elevationswinkel in südlicher Richtung aufweist und dadurch meist durch die Kronen der Bäume abgeschirmt (siehe Abbildungen 2.3 und 2.4) wird.

Der robuste Küstenfunk BEACON  wird in vielen Tälern abseits von großen beschiffbaren Flüssen auch nicht empfangen (PURFÜRST ET AL. 2007; HÜCKEL 2007). Dies gilt besonders für die Täler von Gebirgen. Die Systeme SAPOS  und ASCOS  scheitern oft an der dauerhaften, ungestörten Verfügbarkeit eines Handynetzwerkes im Wald, mittels dem die Korrektursignale übertragen werden.

Da kein Korrektursignal im Wald flächendeckend vorhanden ist, kann sich die Forstwirtschaft nicht auf ein System konzentrieren, was die Positionsgenauigkeit stark beeinflusst. Abbildung 2.5 stellt die Genauigkeitsveränderung bei der Verwendung eines Korrektursignales eindrucksvoll dar. Viele kommerzielle Systeme nehmen nach langen Praxisphasen daher wieder Abstand von der Verwendung von Korrektursignalen im Wald (BÖHME 2010; GABRIEL 2008). Post-Processing ist jedoch unabhängig von dem Waldbestand und kann verwendet werden.

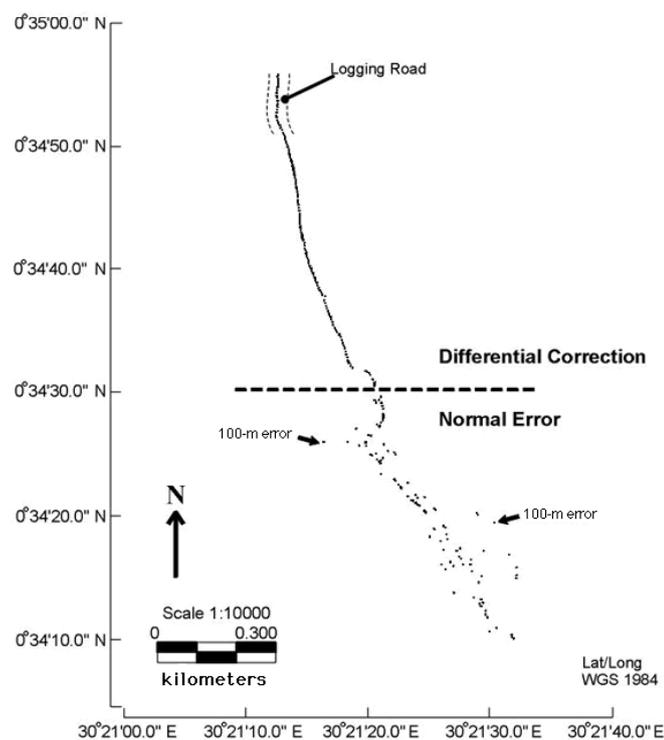


Abbildung 2.5: Einfluss des Korrektursignales bei kinematischer Messung aus DOMINY & DUNCAN (2001)

2.3.2 Erreichte Genauigkeiten im Wald

Es existiert eine Vielzahl von Untersuchungen über die Genauigkeit von GNSS im Wald. Dabei werden unterschiedlichste Bedingungen, Empfänger, Zeitpunkte und weitere Einflussfaktoren beschrieben. Vorliegendes Kapitel stellt die relevantesten Ergebnisse und deren Einflussfaktoren zusammen.

2.3.2.1 Statische Genauigkeit

Viele Wissenschaftler beschäftigten sich mit der statischen Genauigkeit. Die Ergebnisse streuen jedoch sehr stark, besonders weil die Genauigkeit von vielen Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren abhängt.

GIMPL (2002) konnte in der Lagekomponente Standardabweichungen von 1 m bis 3,50 m und in der Höhenkomponente von 1,50 m bis 6,50 m mithilfe eines Leica GS 50 in einem Waldbestand nachweisen. FALKENRIED (2004) stellte bei Versuchen zur Einzelbaumvermessung bei der Verwendung eines geodätischen GNSS-Empfängers (Topcon Legacy-E mit PGA-1 Antenne) eine mittlere Genauigkeit von 3,1 m (68%-Quantil) bzw. von 7,7 m (95%-Quantil) in unterschiedlichen Beständen fest. Dies ist besser als die Ergebnisse von HAMBERGER (2001) mit Korrektur zwischen 2,9 m und 6,9 m, welche mit einem Leica GS 50 ermittelt wurden. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch FRITZ & GAWEHN (2001).

Die Angaben der zahlreichen Untersuchungen schwanken sehr stark und lassen sich nur bedingt miteinander vergleichen, da viele auf Einzelmessungen beruhen und nur für die vorgefundenen definierten Bedingungen (Empfänger, Bestand, Uhrzeit...) ihre Gültigkeit besitzen (HÜCKEL 2007; SAKAI ET AL. 2006; GÖTTING 2004; RESNIK 2002, u. a.). Jedoch kommen die meisten Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass die Werte zwischen 3 und 10 Metern streuen. Selten konnten Genauigkeiten im Submeterbereich nachgewiesen werden. Die Untersuchungen von NAUMANN ET AL. (2003) mittels eines GNSS-Hybridempfängers erreichten teilweise unter Waldbedingungen die gewünschte Submetergenauigkeit. Sie betonen jedoch, dass dafür die Nutzung eines Korrekturdatendienstes unabdingbar ist. Diese Genauigkeit konnte allerdings mit den gleichen Geräten und Korrekturdiensten nicht flächendeckend nachvollzogen werden (ERLER ET AL. 2004a; HÜCKEL 2007; PURFÜRST ET AL. 2007; PURFÜRST & ERLER 2007).

GIMPL (2002) stellten in seinen Untersuchungen fest, dass eine längere Beobachtungsdauer nicht automatisch eine höhere Genauigkeit im Wald nach sich zieht. Daher empfiehlt er diese bei Forstvermessungen, im Sinne der Wirtschaftlichkeit, kurz (ca. 10 Sekunden) zu halten.

2.3.2.2 Kinematische Genauigkeit

Die kinematische Genauigkeit bezeichnet die Erfassung der aktuellen Position in Veränderung über der Zeit. Im Bereich des Waldes ist dies besonders für fahrende Fahrzeuge wichtig. So untersuchte [DABRINGHAUS \(2007\)](#)¹ die unterschiedlichen kinematischen Genauigkeiten von sieben verschiedenen Low-Cost- und High-Cost-GNSS-Empfängern unter Überschirmung im direkten Vergleich. Er fand heraus, dass die Genauigkeiten relativ unabhängig vom Empfänger stark streuen und die mittlere Abweichung zwischen drei und sechs Metern betrage. [Abbildung 2.6](#) stellt die Methodik und die Genauigkeit dar. Die Messungen erfolgten ohne Korrektursignal, da auf den Messflächen keins verfügbar war.



Abbildung 2.6: Versuche von [DABRINGHAUS \(2007\)](#)

[DABRINGHAUS \(2007\)](#) stellte weiterhin fest, dass bei einem kinematischen Betrieb unter starker Überschirmung nur geringfügige Unterschiede zwischen Low-Cost- und High-Cost-Empfängern bestanden. Er führt dies auf die Firmware und den damit verbundenen „normalen“ Einsatz zurück.

[HÜCKEL \(2007\)](#) fand beim Einsatz eines Leica GS 50 auf einer Forstmaschine (Harvester) Standardabweichungen zwischen 2,3 m und 4,8 m, welche sehr stark mit dem gemessenen PDOP von 3,14 bis 4,7 korreliert. Ähnliche Ergebnisse konnte auch [DAFFNER \(2001\)](#) bei Untersuchungen mit einem DGPS-Empfänger nachweisen. Bei seinen Untersuchungen lagen 50 % aller Werte innerhalb von drei Metern, bei einer mittleren Abweichung von 3,4 m. Das 95%-Quantil der Messwerte konnte er bei ca. 12 m feststellen, obwohl der Empfänger im Mittel sieben Satelliten zur Positionsbestimmung verwendet hat.

¹vom Autor betreute Abschlussarbeit

BÖHME² untersuchte 2009 einen Harvestereinsatz im Fichtenbestand. Dabei wurden die per GNSS vermessenen Rückegassen nachträglich terrestrisch mit Katastergenauigkeit vermessen. Abbildung 2.7 stellt die Genauigkeit der Messung dar.

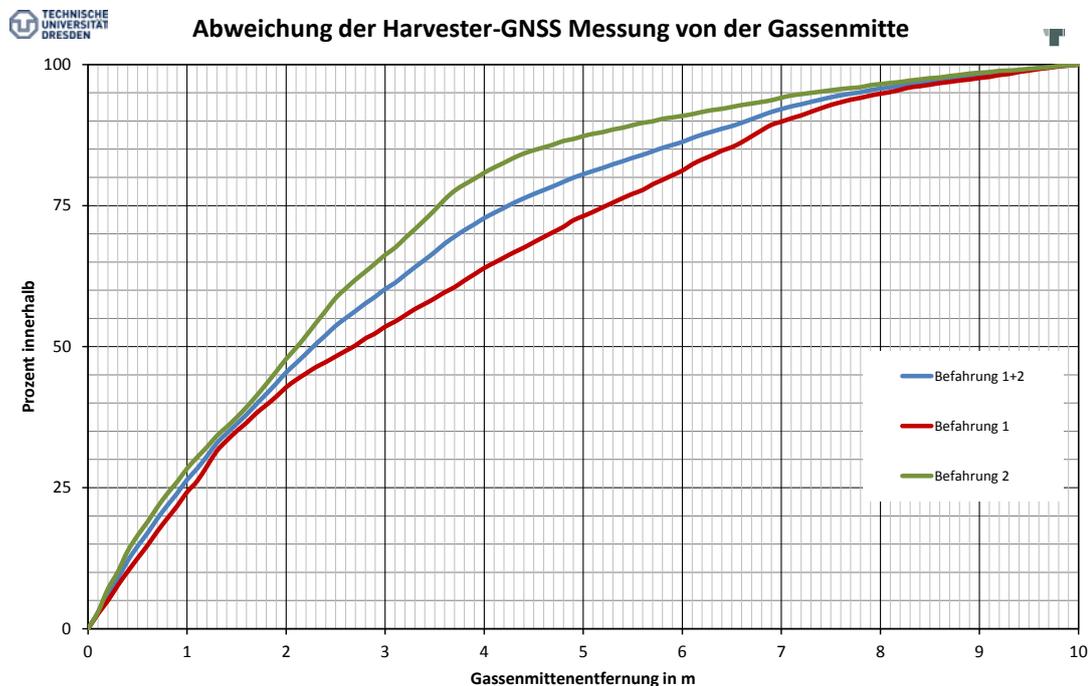


Abbildung 2.7: Genauigkeit von GNSS bei Harvesteraufzeichnung (PURFÜRST ET AL. 2010)

Weiterhin konnte BÖHME (2010) herausfinden, dass die Messungen bei höheren Geschwindigkeiten eine höhere Genauigkeit erbringen. Dies ist wahrscheinlich auf den verwendeten Glätte-Algorithmus der aufzeichnenden Software („eTimber“) zurückzuführen.

Auch HAMBERGER (1999) stellte Beeinträchtigungen des Waldes bei kinematischen Messungen feststellen. Er konnte bei seinen Messungen unter der Krone lediglich 44 % der Punkte im 5 m Korridor erfassen, wobei es bei Messungen auf einer Freifläche 89 % waren. Es konnte bei den Untersuchungen oft das Phänomen des Parallelversatzes bei Satellitenwechsel von mehreren Metern nachgewiesen werden, was einen starken Einfluss auf die kinematische Genauigkeit ausübt (HAMBERGER 2001). Er schätzt die kinematischen Messungen im Forstbereich als labil ein. TACHIKI ET AL. (2005) empfehlen daher die Verwendung eines Geschwindigkeitsfilters.

Die dynamische Genauigkeit von GNSS-Empfängern ist auch unter Freiland-Bedingungen geringer als die statische Genauigkeit. Dies konnte WELTZIEN (2003) bei standardisierten Versuchen auf einer Rundlauf-Prüfbahn nachweisen. Interessant ist, dass einzigst der (Low-cost) Garmin-Empfänger (GPS35) einen etwas höhere dynamische Genauigkeit von ca. 3 m aufweist, wobei seine statische Genauigkeit bei 3,4 m liegt.

²vom Autor betreute Abschlussarbeit

2.3.2.3 Einflussfaktoren auf die Genauigkeit

Überschirmungsintensität

Besonders die Überschirmung des Waldes hat einen großen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern. Die Bestandeskrone ist jedoch nicht homogen, sondern besteht aus einer Vielzahl von Blättern, Nadeln, Zweigen, Ästen und Stämmen. Darüber hinaus sind die Bäume unterschiedlich bekrönt, es existieren teilweise Lücken und die Struktur der Bestände kann einschichtig oder vielschichtig sein. Daher sehen [NAUMANN ET AL. \(2003\)](#), [PURFÜRST \(2002\)](#) und [HAMBERGER \(2001\)](#) in der Satellitenverfügbarkeit, welche durch die Überschirmung stark verringert wird, den größten limitierenden Faktor für die Genauigkeit. Dies bestätigt auch [NAESSET \(1999\)](#), der einen Zusammenhang zwischen der Qualität der Position und der Bestandesgrundfläche findet. [RODRIGUEZ-PEREZ ET AL. \(2006\)](#) kommen zur selben Schlussfolgerung bei der Verwendung eines Indices aus Dichtstand und Baumhöhe.

Besonders der Überschirmungsgrad hat einen entscheidenden Einfluss auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern. So stellten [HOLDEN ET AL. \(2001\)](#) bei geringer Überschirmung eine zwei- bis dreimal schlechtere Genauigkeit und bei starker Überschirmung einen fünf- bis siebenmal schlechtere Genauigkeit im Bezug zur Freifläche fest.

[SIGRIST ET AL. \(1999\)](#) schlussfolgerte aus ihren Messungen, dass sich bei einem Überschirmungsgrad von 100 % der RMS-Fehler im Gegensatz zu einer 20%-Fläche verdoppelt. [HOLDEN ET AL. \(2001\)](#) hingegen meinten, dass eine Überschirmung unter 20 % zu ähnlichen Werten wie die Freifläche führt. Die Untersuchungen von [GIMPL \(2002\)](#) bestätigen diese Vermutungen und sind in [Abbildung 2.8](#) als Abhängigkeit der Lagegenauigkeit (Standardabweichung) von der Abschattung der Kronen dargestellt.

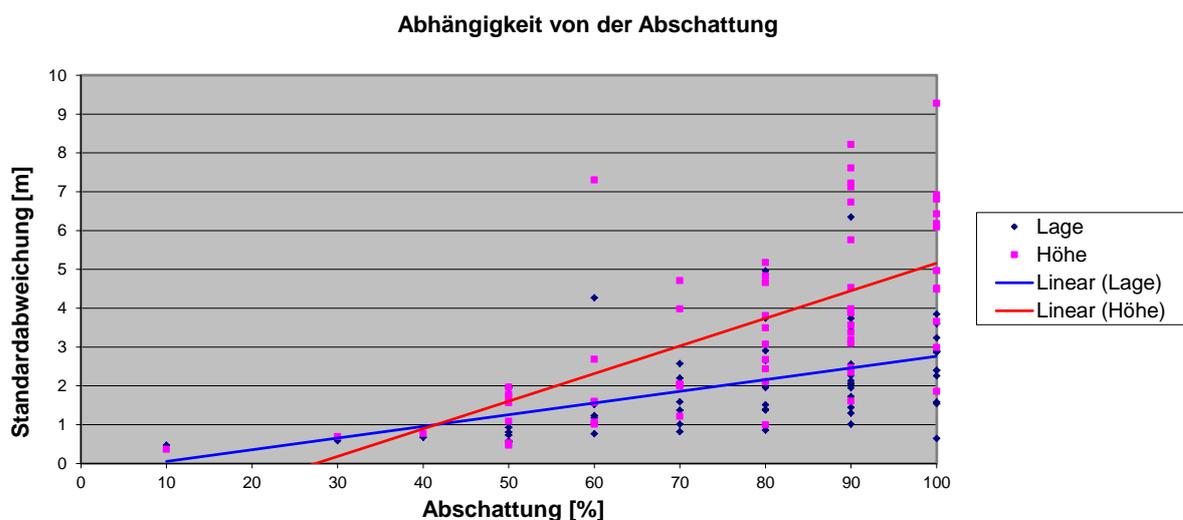


Abbildung 2.8: Abhängigkeit der Schwankung von der Abschattung aus [GIMPL \(2002\)](#)

BÖHME (2010) konnte bei ihren Untersuchungen von Harvesterpositionen im Wald feststellen, dass bei der zweiten Befahrung, bei der die Überschirmung durch die bereits entnommenen Bäume geringer ist, eine höhere Positionsgenauigkeit gemessen werden kann (siehe Abbildung 2.7). HOLDEN ET AL. (2002) konnten dagegen keinen Einfluss des Überschirmungsgrades auf die Genauigkeit bei kinematischen Messungen feststellen.

Auch die Baumhöhe spielt eine Rolle. So ist der Empfang in Beständen mit einer Höhe kleiner als 20 m schlechter als in Beständen mit einer Höhe über 20 m (HAMBERGER 1999). Diesen Zusammenhang zwischen Baumhöhe und Genauigkeit fanden auch FIRTH & BROWNLIE (1998).

Als Hauptursache für die Verringerung der Positionsgenauigkeit vermutet FALKENRIED (2004), dass die dünnen Äste und Blätter den Multipath-Effekt stark begünstigen und besonders das Signal-Rausch-Verhältnis stören. HAMBERGER (1996) hingegen vermutet, dass eher die Baumstämme in unmittelbarer Nachbarschaft als die Dichte der Baumkronen den stärksten Einfluss ausüben.

Der Abschirmungseffekt des Kronendaches wirkt nicht nur direkt unter der Überschirmung, sondern übt auch im Randbereich und in einiger Entfernung des Waldes noch einen großen Einfluss aus (PIRTI 2008).

Um die Abschattung theoretisch berechnen und vorhersagen zu können entwickelte GREIFENEDER (2005) ein Programm, wobei mithilfe des Satellitenstandes und LIDAR-Daten die Sichtbarkeit der Satellitensignale für die Zukunft simuliert wird. Dieses Tool ist jedoch für Gebäude erstellt und berücksichtigt nicht die Signaldurchlässigkeit der Baumkronen. Somit kann es in vorliegender Arbeit nicht zur Anwendung gebracht werden.

Waldtyp

Wald ist nicht gleich Wald. Daher muss zwischen verschiedenen Waldtypen unterschieden werden. Diese unterscheiden sich teilweise in ihren Eigenschaften sehr stark. So fand HAMBERGER (1999) heraus, dass die Positionsgenauigkeit im Nadelholz besser ist als im Laubholz. Er führt dies auf die Kronenform der Fichte zurück, welche günstiger für die Signaldurchlässigkeit ist. SIGRIST ET AL. (1999) untersuchten verschiedene Waldtypen hinsichtlich der Genauigkeit. In Abbildung 2.9 sind sowohl der mittlere PDOP als auch der mittlere horizontale Fehler für verschiedene Waldtypen dargestellt. Dabei erreicht erstaunlicherweise die Kiefer mit ihrer relativ gut lichtdurchlässigen Krone die größten Fehler.

KENNEDY (1997) stellte bei seiner Forschung in Neuseeland fest, dass die Empfangsbedingungen unter dem Kronendach von Kiefern (*Pinus radiata* DON) schwieriger sind als unter dem von autochtonen Baumarten. Aber auch innerhalb von Laubbäumen gibt es zum Teil erhebliche Unterschiede. So bewirken die dicken Blätter von Mangroven eine größere Abschattung als die dünnen Blätter von Eukalyptusbäumen (LANCE 1993).

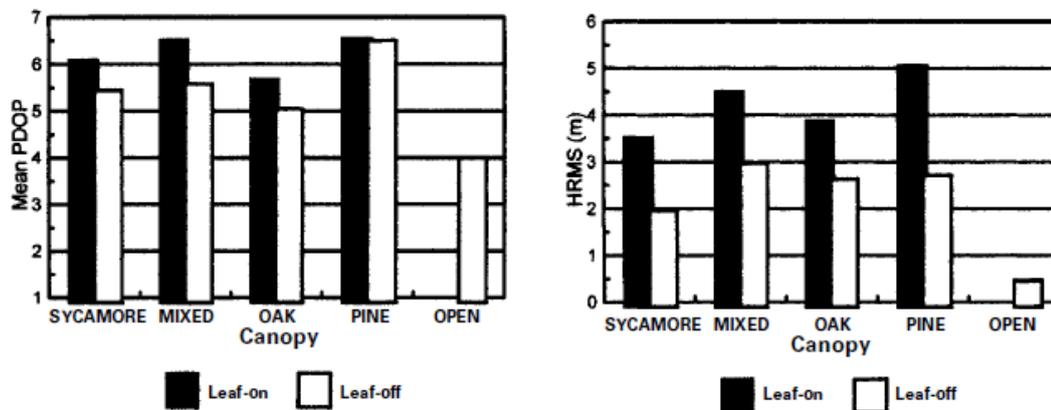


Abbildung 2.9: Abhängigkeit der Schwankung vom Waldtyp aus [SIGRIST ET AL. \(1999\)](#)

Jahreszeiten

Eng verbunden mit dem Waldtyp ist der Einfluss der Jahreszeiten. Dies gilt besonders für Laubwald, da der Blattaufwurf im Winter die Empfangssituation stark beeinflusst. So hat [HAMBERGER \(1999\)](#) bei kinematischen Messungen bessere Ergebnisse im Winter als im Sommer ermittelt. Auch sind die Aufzeichnungen im Winter kontinuierlicher und streuen weniger. Dies bestätigen auch die Untersuchungen von [SIGRIST ET AL. \(1999\)](#) wobei alle von ihnen untersuchten Bestände im unbelaubten Zustand einen geringeren Fehler aufwiesen (siehe Abbildung 2.9). [KORTH & RESNIK \(2005\)](#) stellten einen 15-20-prozentigen Genauigkeitsvorteil im unbelaubten Zustand fest.

Selbst innerhalb einer Kiefernplantage konnten [SIGRIST ET AL. \(1999\)](#) signifikante Unterschiede zwischen den Monaten Dezember und September nachweisen, wobei der Fehler des Wintermonates viel geringer ausfiel als im Herbst. Sie führen dies auf den immerhin 5%igen Nadelverlust im Winter zurück.

Im Gegensatz dazu betonen [NAUMANN ET AL. \(2003\)](#) in einer Untersuchung zur Brauchbarkeit terrestrischer Korrekturdatendienste jedoch, dass kahle Äste einen größeren Einfluss auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung als das Laubdach hätten und die Messung im unbelaubten Zustand schwieriger sei.

Satellitenkonstellationen

Durch die Abschirmung kommt es zu ungünstigen Satellitenkonstellationen. Die Satellitensignale gelangen meist durch Lücken in den Bestand, wobei die Signale unterschiedliche Laufzeiten durch das Kronendach absolvieren. Damit wird die Qualität der Signale verringert bzw. werden diese vollständig abgeschirmt. Somit ergeben sich meist ungünstige Satellitenkonstellationen, welche bedingt durch einen hohen PDOP-Wert, zu geringen Positionsgenauigkeiten führen ([DOMINY & DUNCAN 2001](#)). Abbildung 2.10 stellt dies am Beispiel dar.

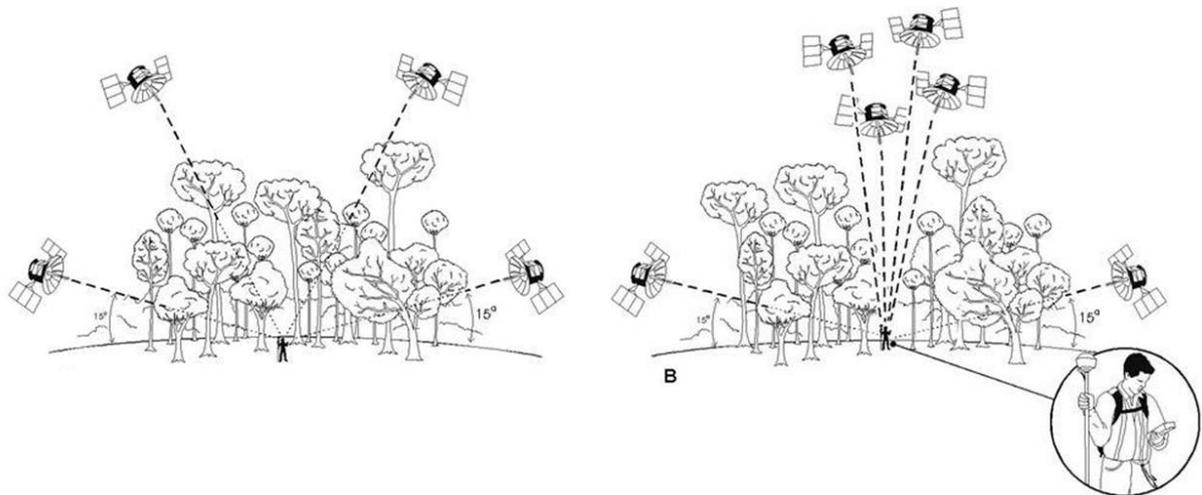


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung des PDOP (DOMINY & DUNCAN 2001)

Die GPS-Satelliten weisen eine Bahnneigung von ca. 55° auf. Dadurch entsteht das so genannte Nordloch auf der nördlichen Hemisphäre, in dem keine Signalquellen vorhanden sind. Dies führt zu einer Fehlerfortpflanzung aufgrund einer nicht ausgewogenen Satellitengeometrie. Die Nord-Süd-Komponente eines Koordinatentripels enthält somit einen höheren Fehlerquotienten gegenüber der Ost-West-Komponente (WEISS 2006). Bei der schon eingeschränkten Auswahl an verfügbaren Satelliten im Wald macht sich dieser Fehler besonders stark bemerkbar.

Darüber hinaus fordert GREIFENEDER (2005), dass bei geodätischen Messungen der Höhenwinkel der Satelliten mindestens 15° betragen sollte, um viele Fehlerquellen auszuschließen. Aufgrund von Signalbeugung können theoretisch auch Signale vom Satelliten unter 0° empfangen werden (GREIFENEDER 2005). Dies trat in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht auf.

Wind

LÜKE & HEELING (1996) stellte fest, dass bei windigem Wetter und den daraus resultierenden Baumbewegungen es zu kurzzeitigen Signalunterbrechungen kommen kann. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch FALKENRIED (2004). Er nennt starke Windböen und die damit verbundene Abschattung der Äste als Ursache für längere Wartezeiten durch Satellitenverlust und sieht den Wind als wesentlichen Einflussfaktor auf die Positionsgenauigkeit von GNSS im Wald an. Auch GIMPL (2002) und ENGELS (2001) schließen sich dieser Meinung an und schätzten den Einfluss des Windes als ungünstig ein. SIGRIST ET AL. (1999) vermuten, dass die schwankenden Kronen zu einem erhöhten Multipath-Effekt führen. Eine quantitative Angabe zum Einfluss des Windes auf die Positionsgenauigkeit wurde in der Literatur nicht gefunden.

Signalbeugung

Bei der Signalbeugung wird die Sichtverbindung zum Satelliten „unterbrochen“. Nur das frequenzunabhängige gebeugte Signal, welches als Umwegesignal bezeichnet wird, wird empfangen (WANNINGER ET AL. 2000). Im Wald dringen die Signalanteile weiterhin durch das Laub, daher ist es möglich, dass trotz Signalverlusten der Satellit noch für eine Positionsbestimmung verwendet werden kann. Abbildung 2.11 stellt die Beeinflussung des Signal-Rausch-Verhältnisses bei dem Satellitendurchgang durch einen Baum dar. Messunterbrechungen (Verlust des Signals) fanden dabei nicht statt. Nach WANNINGER ET AL. (2000) liegt der dadurch erzeugte Fehler im dm-Bereich.

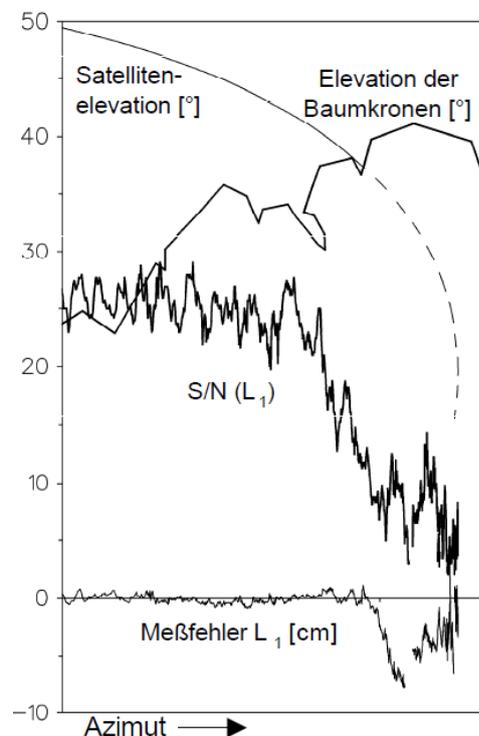


Abbildung 2.11: Einfluss eines Baumes auf die Beugung von Satellitensignalen
aus WANNINGER ET AL. (2000)

Feuchtigkeit

Die Bäume versuchen durch eine möglichst große Oberfläche der Blätter und Nadeln möglichst große Mengen an Sonnenlicht für die Photosynthese zu absorbieren. Diese Oberfläche ist bei Regen mit einem Wasserfilm überzogen. Dieses Wasser filtert das Signal aus und die Verbindung zum Satellit wird verhindert (HAMBERGER 2001; KETTEMANN 1995). Dadurch soll die Zahl der Satelliten an Regentagen eingeschränkt werden (HAMBERGER 2001). OEFVERBERG (1995) konnte 30-50 % der Positionen an Regentagen nur 2-dimensional bestimmen. An trockenen Tagen waren es hingegen nur 10-15 %. Dies bestätigen auch LÜKE & HEELING (1996), die besonders den Tropfenbehang als Ursache für einen schlechteren Empfang sehen. KORTH & RESNIK (2005) führen dies auf die erhöhte Dämpfung und Beugung der Signale zurück.

Sonstige Effekte

Zu den erwähnten Effekten kommen viele weitere Fehlerquellen wie atmosphärische Effekte, Uhrenungenauigkeit, Rundungsfehler, relativistische Effekte und Schwankungen der Satellitenumlaufbahnen. Diese Effekte wirken jedoch auf die Empfänger oberhalb und unterhalb der Baumkronen gleich ein und sollen daher in vorliegender Arbeit nicht näher betrachtet werden (KÖHNE & WÖSSNER 2010).

Darüber hinaus wurde in der Literatur keine Untersuchung oder Angabe zum Einfluss der Temperatur gefunden. Auch quantitative Erklärungen über den Einfluss des Bestandes auf die Genauigkeit sind rar. Genau an dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an.

3 Entwicklung einer Versuchsmethodik

Die zentrale Idee der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss des Kronendaches auf den GNSS-Empfang zu untersuchen, indem zeitgleich an verschiedenen Orten GNSS-Signale empfangen und miteinander verglichen werden. Vorliegendes Kapitel befasst sich mit der Entwicklung einer geeigneten und funktionierenden Versuchsmethodik. Dabei werden die verwendeten GNSS-Empfänger, das Untersuchungsgebiet, die Versuchsanordnung, die Datenerhebung und sonstige verfügbare Daten erläutert.

3.1 GNSS-Empfänger

Zum Einsatz für die Versuche kamen vier baugleiche *Garmin GPS 16*-Empfänger. Je zwei in der Ausführung LVS (3,3-6 V) [↗115](#) und HVS (8-40 V) [↗114](#), die sich nur in der Höhe der Versorgungsspannung unterscheiden. Aufgrund der günstigen Anschaffungskosten (ca. 4x150€) und der Fähigkeit, Korrektursignale per RTCM [↗116](#) verarbeiten zu können, wurde sich für den *Garmin GPS 16* entschieden.

Es handelt sich um einen 12-Kanal-GPS-Empfänger, der die GPS NAVSTAR [↗114](#) Satellitensignale zur Positionsbestimmung verwendet. Er wird als OEM-Version [↗115](#) angeboten und verfügt über die Möglichkeit, die Position mittels EGNOS [↗113](#) und mittels RTCM [↗116](#) zu korrigieren. Die statische Genauigkeit [↗113](#) wird von GARMIN (2005) als GPS mit < 15 m (95 %) und als DGPS mit < 3 m (95 %) angegeben (siehe Abbildung G.1). Der Empfänger liefert Daten mit 1 Hz.



Abbildung 3.1: *Garmin GPS 16* (GARMIN 2005)

Die GPS-Empfänger sind mit einem RJ45-Stecker [116](#) versehen. Dieser wurde mit einem vom Autor konstruierten und gebauten Adapter mit einem Computer bzw. Datenlogger verbunden. Als Ausgänge stehen somit je zwei RS232/Sub-D-Stecker [116](#) COM-Schnittstellen [112](#) zur Datenübertragung und ein Mini-Tamiya-Stecker [117](#) als Stromversorgung zur Verfügung. Eine COM-Schnittstelle dient dazu mit dem GPS-Empfänger zu kommunizieren (Konfigurations-Befehle) und Daten im NMEA 0183 Format [115](#) zu empfangen (Output). Die zweite COM-Schnittstelle steht für die Übermittlung von Korrekturdaten (RTCM SC-104 Daten in der Version 2.2 [116](#)) in den Receiver zur Verfügung (nur Eingang).

Die Einstellungen des *Garmin GPS 16* lassen sich mit der vom Hersteller gelieferten Software „Garmin Sensor Configuration Software (SNSRCFG)“ verwalten. Diese lag in der Version 3.2 vor. Es können Empfängereigenschaften, wie die Verwendung von Korrektursignalen, die Kommunikationseigenschaften sowie die Häufigkeit und Typ der ausgegebenen Datensätze eingestellt werden.

Um mehrere Empfänger miteinander vergleichen zu können wurde im Normalbetrieb die Korrekturfunktion (DGPS) [113](#), besonders EGNOS, allerdings nicht verwendet. Somit war gewährleistet, dass die verschiedenen GPS-Empfänger die gleichen Voraussetzungen in den internen Einstellungen aufwiesen.

Die verwendeten Einstellungen des *Garmin GPS 16* sind im Anhang [G.3](#) auf Seite [156](#) und die Gerätespezifikationen sind im Anhang [G.1](#) auf Seite [155](#) dargestellt.

Zum Einmessen der genauen Positionen der *Garmin GPS 16*-Empfängerstandorte kam neben terrestrischen Messverfahren darüber hinaus ein *Topcon Legacy E* Empfänger mit einer *Topcon PGA-1* Antenne zum Einsatz (siehe [Abbildung 3.2](#)). Dieser geodätische GNSS-Empfänger [113](#) kann sowohl die L1-Signale der GLONASS-Satelliten [113](#) als auch der GPS NAVSTAR-Satelliten [114](#) auswerten. Die Positionsdaten wurden mittels dem bidirektionalen Korrekturdienst SAPOS-SN_EPS [116](#) in realtime korrigiert (DGPS [113](#) mittels RTCM [116](#)). Das Datenblatt des Empfängers ist in [Abbildung G.2](#) dargestellt.



Abbildung 3.2: Topcon Legacy E mit PGA1-Antenne

3.2 Untersuchungsgebiete

Als Untersuchungsgebiet wurde das ca. 6.000 ha umfassende, geschlossene Waldgebiet „Tharandter Wald“ in Sachsen (Deutschland) gewählt. Es ist durch eine überwiegend sanftwellige Geländeform zwischen 350 und 450 Meter über NN geprägt. Es kamen dabei zwei verschiedene Standorte für die Installation der vier verwendeten GPS-Empfänger (*Garmin GPS 16*, siehe 3.1) zum Einsatz: „Ökologisches Versuchsmessfeld“ und „Buchenbestand am Pferdestall“ (siehe Abbildung 3.3 und Übersichtskarte A.1 im Anhang Seite 120).

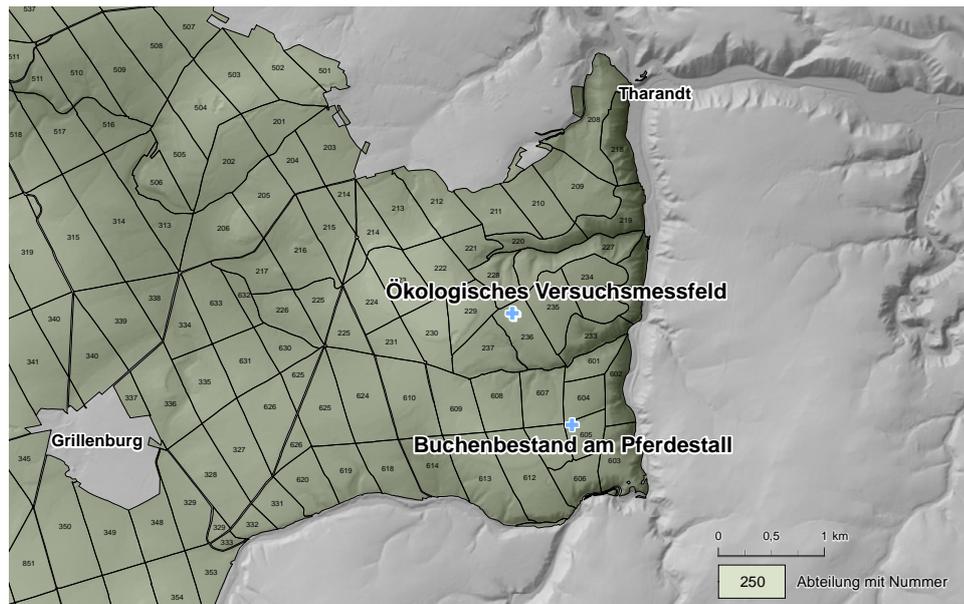


Abbildung 3.3: Lage der zwei Versuchsfächen im Untersuchungsgebiet Tharandter Wald

Ökologisches Versuchsmessfeld

Die Technische Universität Dresden betreibt ein Versuchsmessfeld, um die Interaktionen der Umwelt mit dem Wald zu messen. Besonders zu erwähnen ist die an diesem Ort installierte meteorologische Station, auf der mit einer Vielzahl von Sensoren der aktuelle Zustand der Atmosphäre, der Bäume und des Bodens gemessen wird. Auf diese Daten ist der Zugriff im Rahmen der vorliegenden Arbeit möglich.

Die Versuchsanlage befindet sich auf einem Hochplateau und besteht aus einem ca. 117 Jahre alten Fichten-Reinbestand (*Picea abies* L.) mit einer Höhe von ca. 32 m und einer Grundfläche von $40 \frac{m^2}{ha}$. Mitten in diesem befindet sich ein 42 m hoher Messturm, welcher sich über die Baumkronen erhebt. Somit ist eine für Messgeräte erreichbare Position oberhalb des Bestandes gegeben. Der Messturm wird zusammen mit drei sich auf dem Boden befindlichen Containern für Computertechnik von der Professur für Meteorologie der Technischen Universität Dresden verwaltet. Ein Stromanschluss zum Betreiben der Messtechnik ist vorhanden und ein ganzjährig auf 18 °C klimatisierter Container (siehe Abbildung 3.5) konnte für den vorliegenden Versuch mit genutzt werden.



Abbildung 3.4: Messturm der Versuchsanlage Ökologisches Versuchsmessfeld
(EICHELMANN 2005)



Abbildung 3.5: Darstellung der Versuchsanlage Ökologisches Versuchsmessfeld

Buchenbestand am Pferdestall

Als zweites Untersuchungsgebiet wurde ein Buchen-Reinbestand (*Fagus sylvatica* L.) ausgewählt. Dieser hat, im Gegensatz zum Fichtenbestand, folgende wahrscheinlich die GNSS-Messung beeinflussende, abweichende Eigenschaften:

- Ein geschlossenes „Buchendach“ hat einen größeren Überschirmungsgrad ≈ 117 und lässt somit weniger Licht zum Boden (teilweise nur bis zu 2 %, LEITGEB & GÄRTNER 2006). Es beeinflusst auch die Signaldurchlässigkeit.
- Buchen verlieren im Winter ihre Blätter, was den Überschirmungsgrad in dieser Zeit stark sinken lässt.
- Das Verhalten von Buchen bei Wind ist anders als das von Fichten. Die Buchenstämme bewegen sich weniger, wobei sich die Buchenäste verstärkt bewegen. Dieser Aspekt ist stark von der Jahreszeit (Belaubung) abhängig.
- Das Rückhaltevermögen für Wasser (nach Regen bzw. Tau) ist anders.
- Die Blätter von Buchen unterscheiden sich in Häufigkeit, Größe, Oberflächen/Volumenverhältnis und Anordnung von den Nadeln der Fichten.



Abbildung 3.6: GPS-Empfänger im Buchenbestand

Der Abstand der beiden Untersuchungsgebiete voneinander beträgt ca. 1,21 km Luftlinie. Aufgrund der Beschaffenheit des umgebenden Waldes, konnte keine kürzere Distanz gewählt werden. Es standen keine Laubholz-Reinbestände in der Nähe des Ökologischen Versuchsmessfeldes zur Verfügung.

3.3 Versuchsanordnung

Es kamen vier gleiche GNSS-Empfänger (*Garmin GPS 16*, siehe 3.1) zum Einsatz. Drei auf der Versuchsfläche: „Ökologisches Versuchsmessfeld“ und einer auf dem „Buchenbestand am Pferdestall“.

Die Hauptaufgabe vorliegender Arbeit ist es, den Einfluss des Kronendaches auf das Empfangsverhalten von GNSS-Empfängern zu ermitteln. Die Versuchsanordnung verfolgt somit das Ziel, bau- und einstellungsgleiche GNSS-Empfänger sowohl oberhalb des Bestandes (Messturm) als auch unterhalb des Bestandes zu vergleichen. Somit wird ein GPS-Empfänger auf dem Messturm in 42 m Höhe installiert und ein weiterer GPS-Empfänger wenige Meter entfernt im (Fichten-)Bestand unter den Baumkronen.

Beide Empfänger liefern mit einer Frequenz von 1 Hz einen kompletten NMEA-Datensatz $\#115$ (siehe 3.4.2), mit dem ein direkter Vergleich der Empfangssituationen der beiden Empfänger durchgeführt werden kann. Der Empfänger auf dem Turm gilt dabei als „Referenzempfänger“. Theoretisch unterscheiden sich die empfangenen Daten nur um die ca. 40 m Signalweg durch die Baumkronen. Andere Einflussfaktoren wie die Satellitenverfügbarkeit, Effekte der Ionosphäre usw. wirken auf beide Empfänger weitestgehend gleich ein (*ceteris paribus*). Der horizontale Abstand der Empfänger beträgt 16 bzw. 17 m. Abbildung 3.7 stellt die Versuchsanordnung auf dem Versuchsmessfeld schematisch dar.

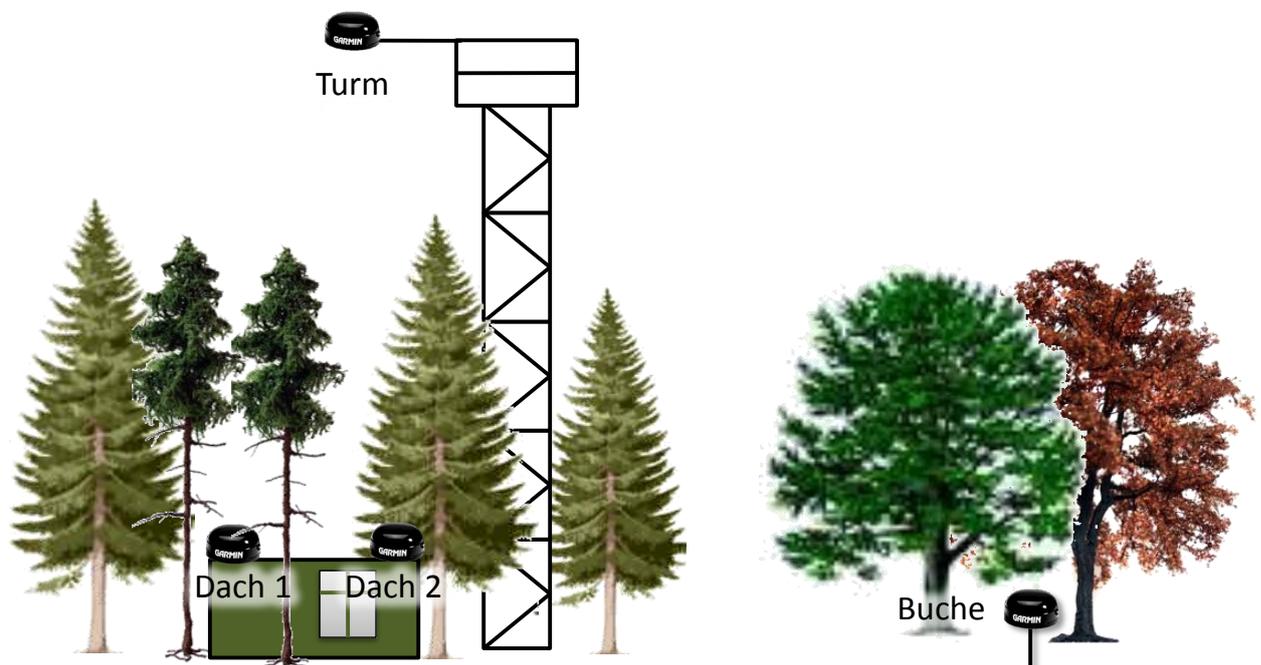


Abbildung 3.7: Darstellung der Anordnung der vier GPS-Empfänger auf der Versuchsanlage Ökologisches Messfeld und im Buchenbestand

Zur Ergänzung der Messungen wurde neben dem GPS-Empfänger im Bestand (Dach 1) ein

zweiter baugleicher GPS-Empfänger (Dach 2) unterhalb der Baumkrone innerhalb des Versuchsfeldes im Abstand von ca. 3 m aufgebaut und betrieben. Die Strom- und Datenleitungen aller drei Empfänger wurden in einem Container (siehe Abbildung 3.5) zusammengeführt und COM-Schnittstellen ¶112 an einem stationären PC angeschlossen. Die GPS-Daten wurden mittels der vom Autor erstellten Software „GNSS-Analyser“ aufgezeichnet (siehe auch 3.4.3 und H).

Der vierte GPS-Empfänger (Buche) wurde im „Buchenbestand am Pferdestall“ (siehe Abbildung 3.6) aufgebaut. Dadurch war die Empfangssituation in einem Laubholzbestand gegeben.



Abbildung 3.8: GPS-Empfänger auf dem Messturm

Als Zusammenfassung sind die wichtigsten Kenndaten der Standorte der vier GPS-Empfänger in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Versuchsanordnung GPS-Empfänger

	Empfänger 1	Empfänger 2	Empfänger 3	Empfänger 4
Name	Turm	Dach 1	Buche	Dach 2
Standort	Ökologisches Versuchsmessfeld	Ökologisches Versuchsmessfeld	Buchenbestand am Pferdestall	Ökologisches Versuchsmessfeld
Höhe	Turm 42 m	Container 2 m	Buchenbestand 1 m	Container 2 m
Baumart	Gemeine Fichte <i>Picea abies</i> L.	Gemeine Fichte <i>Picea abies</i> L.	Rotbuche <i>Fagus sylvatica</i> L.	Gemeine Fichte <i>Picea abies</i> L.
Bestandestyp	Reinbestand	Reinbestand	Reinbestand	Reinbestand
Empfänger	Garmin GPS 16 HVS	Garmin GPS 16 HVS	Garmin GPS 16 LVS	Garmin GPS 16 LVS

In der vorliegenden Untersuchung wird sich nur auf statische GNSS-Messungen ¶117 konzentriert. Kinematische Messungen ¶114 sind nicht Teil der Untersuchung.

3.4 Datenerhebung

3.4.1 Übersicht

Abbildung 3.9 stellt die Datenerhebung und Datenverarbeitung schematisch dar. Vorliegendes Kapitel beschreibt die Erhebung bis zu den aufgenommenen Daten. In Kapitel 4 wird die Aufbereitung, Speicherung der Daten in der Datenbank und die Analyse beschrieben.

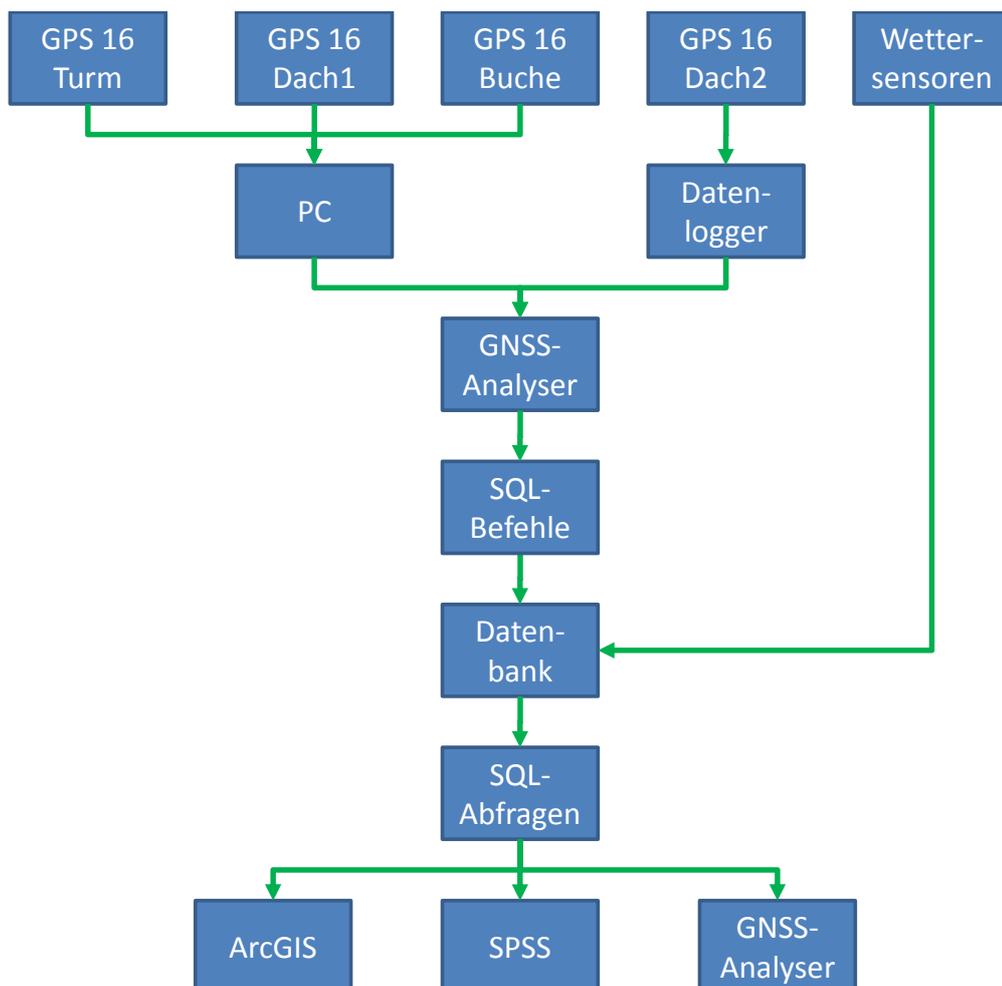


Abbildung 3.9: Übersicht über die Datenerhebung und die -verarbeitung

3.4.2 GPS-Datensätze

Die Datensätze zur Kommunikation mit dem GPS-Empfänger basieren auf der NMEA 0183 [115](#) Schnittstellendefinition, welche von der National Marine Electronics Association herausgegeben wurde ([GARMIN 2005](#)). Es handelt sich um einen offenen Standard. Dies bedeutet, dass von der NMEA Grunddatensätze definiert worden sind, welche durch spezifische Herstellerdatensätze, im vorliegenden Fall Garmin, ergänzt werden können. Zur Absicherung der anstehenden Aufgaben wurden alle potentiell verfügbaren und sinnvollen Datensätze des *Garmin GPS 16*-Empfängers aufgezeichnet. Die Datensätze werden mit einer Frequenz von 1 Hz vom GPS-Empfänger geliefert. In [Tabelle 3.2](#) sind die verfügbaren Datensätze dargestellt.

Tabelle 3.2: Erfasste NMEA 0183 Datensätze nach [GARMIN \(2005\)](#)

Datensatz	Beschreibung
\$GPRMC	Recommended Minimum Specific GPS/TRANSIR Date
\$GPGGA	Global Positioning System Fix Date
\$GPGSA	GPS DOP and Active Satellites
\$GPGSV	GPS Satellites in View
\$PGRME	Estimated Error Information
\$GPGLL	Geographic Position
\$GPVTG	Track Made Good and Ground Speed
\$PGRMV	3D Velocity Information
\$PGRMF	GPS Fix Date Sentence
\$PGRMB	DGPS Beacon Information
\$PGRMM	Map Datum

3.4.3 GPS-Datenaufzeichnung

Die Datenaufzeichnung fand an zwei verschiedenen Orten statt: dem Versuchsgelände der Universität, welches infrastrukturell gut ausgebaut ist und dem Buchenbestand, der aufgrund seiner örtlichen Distanz von ca. 1,2 km weniger gut erreichbar und versorgt ist. Dadurch ergeben sich für die Versuchsgebiete unterschiedliche Gegebenheiten, die die Datenaufnahme maßgeblich beeinflusst haben.

Ökologisches Versuchsmessfeld

Auf dem Versuchsmessfeld ist ein Stromanschluss vorhanden. Somit wurde ein PC in einem Container untergebracht (siehe Abbildung 3.5). Die Datenkabel der GPS-Empfänger: „Turm“, „Dach 1“ und „Dach 2“ liefen in einem stationären Computer zusammen. Das Schaltbild dafür ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

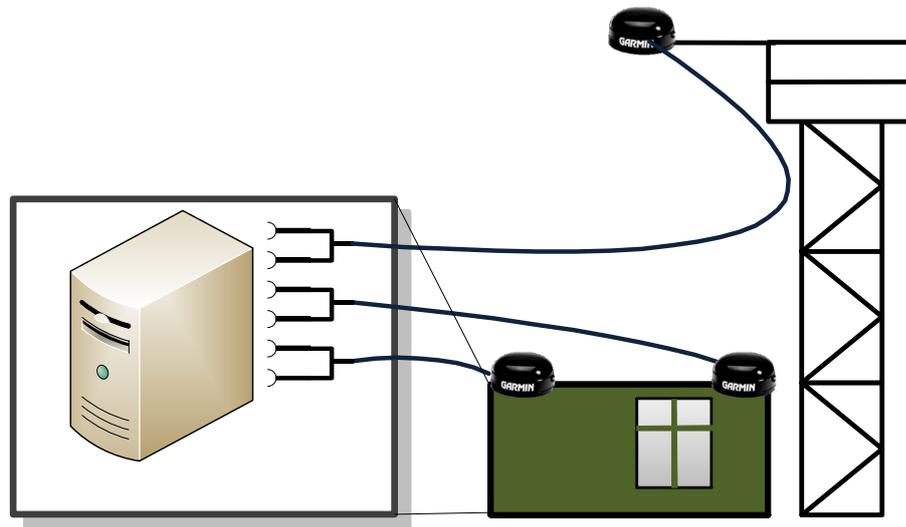


Abbildung 3.10: Anschluss-Schaltbild des Ökologischen Versuchsmessfeldes mit Messturm und Container

Die übermittelten NMEA-Datensätze sind nach Empfänger getrennt mittels der vom Autor erstellten Software namens „GNSS_Analyser“ aufgezeichnet worden (siehe 3.4.3 und H). Nach jeweils 24 Stunden wurde aus Gründen der Datensicherheit, für jeden Empfänger separat die aufgezeichnete Datei unter dem Datum abgespeichert und eine neue Datei für die Aufzeichnung angelegt. Die Größe einer solchen Tages-NMEA-Datei beträgt pro Empfänger ca. 44 MB. Prinzipiell fand auf dem Ökologischen Versuchsmessfeld nur ein reines „logging“ der NMEA-Daten statt.

Buchenbestand am Pferdestall

Durch den im Buchenbestand am Pferdestall nicht vorhandenen Stromanschluss wurde zur Aufzeichnung der Daten ein Datenlogger (ELV SDU 1) verwendet, der die NMEA-Daten auf einen USB-Stick aufzeichnet. Die Kapazität der verwendbaren USB-Sticks ist auf 1 GB limitiert, was maximal 22 Tagen entspricht. Somit entstand für jeden Aufnahmezyklus eine Datei zwischen 200 und 600 MB, in der die NMEA-Datensätze abgespeichert sind.

Die Stromversorgung erfolgte über Blei-Gel-Batterien (12 V), welche je nach Ausführung (28 Ah, 65 Ah) alle 5-10 Tage zusammen mit dem USB-Stick ausgetauscht werden mussten. Im Winter verkürzte sich die Zeitspanne aufgrund der niedrigen Temperaturen etwas, was mit der gleichzeitigen Verwendung (Parallelschaltung) von zwei Akkus kompensiert wurde. Batterien und Datenlogger waren in einer separaten Kiste untergebracht (Abbildung 3.11).



Abbildung 3.11: GPS-Empfänger im Buchenbestand am Pferdestall (links) und Kiste mit Datenlogger und Batterie (rechts)

Um die Spannungsversorgung von 5 V für den Datenlogger und den GPS-Empfänger zu garantieren wurde ein justierbarer DC-Spannungswandler zwischengeschaltet. Das Schaltbild für die Versuchsanlage des Buchenbestandes ist in [Abbildung 3.12](#) dargestellt.

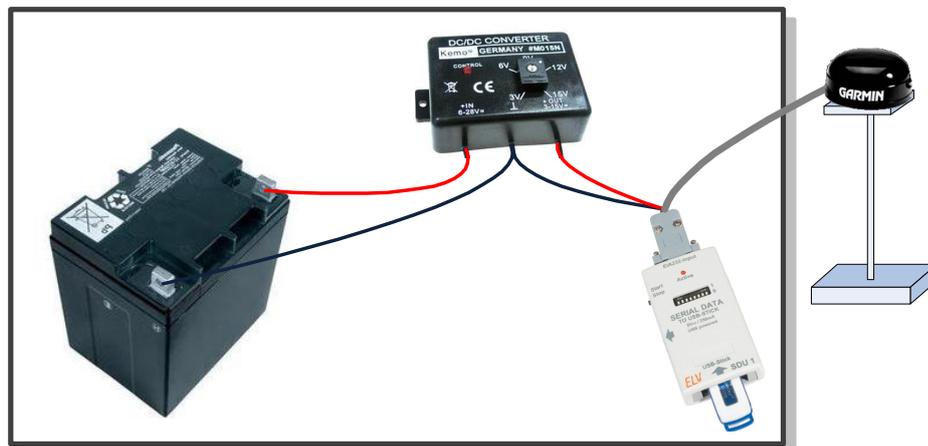


Abbildung 3.12: Anschluss-Schaltbild des Buchenbestandes

In den sehr schneereichen Wintermonaten 2009/10 war die Fläche über längere Zeiträume nicht mit dem Auto erreichbar. Daher wurden die Batterien (ca. 35 kg) mittels Ski und einer Pulka zum und vom Untersuchungsgebiet befördert. Somit konnte auch im Winterzeitraum die Versorgung mit Strom gewährleistet werden.

3.4.4 Weitere verfügbare Daten

3.4.4.1 Wetterdaten

Zusätzlich zu den GPS-Daten stehen Wetterdaten von der Professur für Meteorologie der Technischen Universität Dresden für die Auswertung zur Verfügung. Diese wurden auf dem Ökologischen Messfeld, also direkt am Standort der GPS-Empfänger, erhoben. Alle Wetterdaten wurden in die Datenbank eingepflegt und mit den GPS-Daten verknüpft.

3.4.4.1.1 Luftbewegung

Die Bewegung von Luft (Wind) und die damit verbundenen Bewegungen der Blätter, Äste und Stämme, können zu einer Beeinflussung der GPS-Empfangsqualität führen. Die Bewegung der Bäume ist nur unspezifisch und indirekt zu erfassen. Daher sollen hochaufgelöste Winddaten für eine Analyse herangezogen werden. Die Daten über die Luftbewegung liegen in zwei unterschiedlichen Auflösungsvarianten vor:

Halbstündliche 2D-Auflösung

Für die gesamte Versuchsperiode ist die horizontale Windgeschwindigkeit mit einer zeitlichen Auflösung von 30 min (arithmetischer Mittelwert der Einzeldaten) verfügbar. Diese wurden mit einem Schalen-Anemometer, welcher sich auf dem Messturm in 43 m Höhe befindet (siehe Abbildung 3.13), ermittelt. Die Auflösung der horizontalen Windgeschwindigkeit beträgt $\frac{1}{100} \frac{m}{s}$.



Abbildung 3.13: 3D-Ultraschall-Anemometer (links) und Schalen-Anemometer (rechts) des Messturmes

Minütliche 3D-Auflösung

Hochaufgelöste Daten über die Windgeschwindigkeit liegen in den drei Raumrichtungen vor, wobei sich aus deren Vektoren auch die Windrichtung berechnen lässt. Die Aufnahme erfolgte mit einem 3D-Ultraschall-Anemometer [117](#), welches in einer Höhe von 40 m über den Bestandesboden auf dem Versuchsturm (Abbildung [3.13](#)) montiert ist.

Die mit 20 Hz aufgenommenen Werte wurden anschließend durch die Bildung des arithmetischen Mittelwertes auf ein Intervall von $\frac{1}{min}$ umgerechnet. Diese summarischen Daten stehen für die Auswertung zur Verfügung. Dabei werden nicht nur die arithmetischen Mittelwerte erfasst, sondern auch die Standardabweichung sowie die maximale Windgeschwindigkeit, jeweils in den drei Raumdimensionen. Die Berechnungen der mittleren horizontalen und der mittleren dreidimensionalen Windgeschwindigkeit sind in Formel [3.1](#) dargestellt.

$$V_{w_{2D}} = \sqrt{V_{w_x}^2 + V_{w_y}^2} \quad (3.1a)$$

$$V_{w_{3D}} = \sqrt{V_{w_x}^2 + V_{w_y}^2 + V_{w_z}^2} \quad (3.1b)$$

$V_{w_{2D}}$	Betrag des 2D-Wind-Vektors $\hat{=}$ horizontaler Wind
$V_{w_{3D}}$	Betrag des 3D-Wind-Vektors
V_{w_x}	Windgeschwindigkeit in X-Richtung
V_{w_y}	Windgeschwindigkeit in Y-Richtung
V_{w_z}	Windgeschwindigkeit in Z-Richtung

Formel 3.1: Berechnung der Windgeschwindigkeit

Im Gegensatz zum Schalen-Anemometer liegen nur Daten für insgesamt 5 Monate vor. Es handelt sich dabei um Nov. 2009, Dez. 2009, März 2010, April 2010 und Mai 2010. Die Monate Jan. 2010 und Feb. 2010 wurden aus der Datenauswertung herausgenommen, da durch die Vereisung der Messgeräte viele nicht plausible Werte auftraten. Die Auflösung der 3D-Windgeschwindigkeit beträgt $\frac{1}{100} \frac{m}{s}$.

3.4.4.1.2 Temperatur

Die Temperaturwerte stehen über den gesamten Untersuchungszeitraum zur Verfügung und wurden auf dem Ökologischen Versuchsmessfeld mit Hilfe eines Thermometers automatisch erfasst. Die Auflösung der Temperatur beträgt $\frac{1}{100} ^\circ\text{C}$.

3.4.4.1.3 Luftfeuchte

Neben der Temperatur liegt, als weitere mögliche Einflussgröße, die relative Luftfeuchte in einer Auflösung von 30 min vor. Die Daten wurden auf dem Ökologischen Versuchsmessfeld mit Hilfe eines Hygrometers erfasst. Die Luftfeuchtwerte stehen über den gesamten Untersuchungszeitraum zur Verfügung, wobei die Auflösung $\frac{1}{100} \%$ beträgt.



Abbildung 3.14: Luftfeuchte- und Temperaturmessung auf dem Ökologischen Messfeld

3.4.4.1.4 Niederschlag

Die Niederschlagswerte stehen über den gesamten Untersuchungszeitraum mit Werten aller 30 min zur Verfügung. Die Daten wurden mittels automatischem Niederschlagsmesser bei einer Auflösung von $\frac{1}{10} \frac{mm}{\frac{1}{2}h}$ auf dem Ökologischen Versuchsmessfeld erhoben.



Abbildung 3.15: Niederschlagsmessung auf dem Ökologischen Messfeld

Durch die Kombination aus Temperatur und Niederschlag lässt sich auf die Art des Niederschlages (Wasser oder Schnee) schließen.

Alle aufgeführten Wetterdaten waren in MEZ [☞115](#) und die GPS-Daten in UTC [☞117](#) datiert. Daher wurden die Wetterdaten in der Datenbank auf UTC-Zeit umgerechnet.

3.4.4.2 Überschirmung

Die Untersuchungen fanden in einem Fichten-Reinbestand und in einem Buchen-Reinbestand statt. Fichten haben die Eigenschaft, bis zu fünf Nadeljahrgänge an ihren Zweigen und Ästen zu halten. Dadurch sind sie immergrün und verändern ihren Blattflächenindex [112](#) über das Jahr gesehen nur geringfügig. Somit bleibt auch der Überschirmungsgrad [117](#) relativ konstant und wird nicht weiter berücksichtigt. Abbildung [A.2](#) stellt den Fichtenbestand des Ökologischen Messfeldes dar.

Anders sieht dies im Buchenbestand aus. Buchen verlieren im Herbst ihre Blätter, was sich sowohl auf den Blattflächenindex als auch auf den Überschirmungsgrad signifikant auswirkt. Eine Hypothese dieser Arbeit lautet, dass dies einen Einfluss auf die GNSS-Qualität hat.

Um den Überschirmungsgrad des Buchenbestandes einschätzen zu können, wurden in zeitlichen Abständen Bilder von der Buchenkrone über dem GPS-Empfänger Nr. 3 (Buchenbestand) erhoben. Als Kamera kam eine Canon EOS 400D zum Einsatz. Diese wurde sowohl mit einem „normalen“ Objektiv als auch mit einem Fisheye-Objektiv verwendet.

Die Bilder wurden anschließend mittels einem von [SCHWALBE ET AL. \(2006\)](#) am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Dresden entwickelten Verfahren über den Grünkanal des Bildes klassifiziert und somit der Anteil der freien Himmelsfläche bestimmt. Dadurch wird im Folgenden der Überschirmungsgrad hergeleitet (siehe Abbildung [3.16](#)).

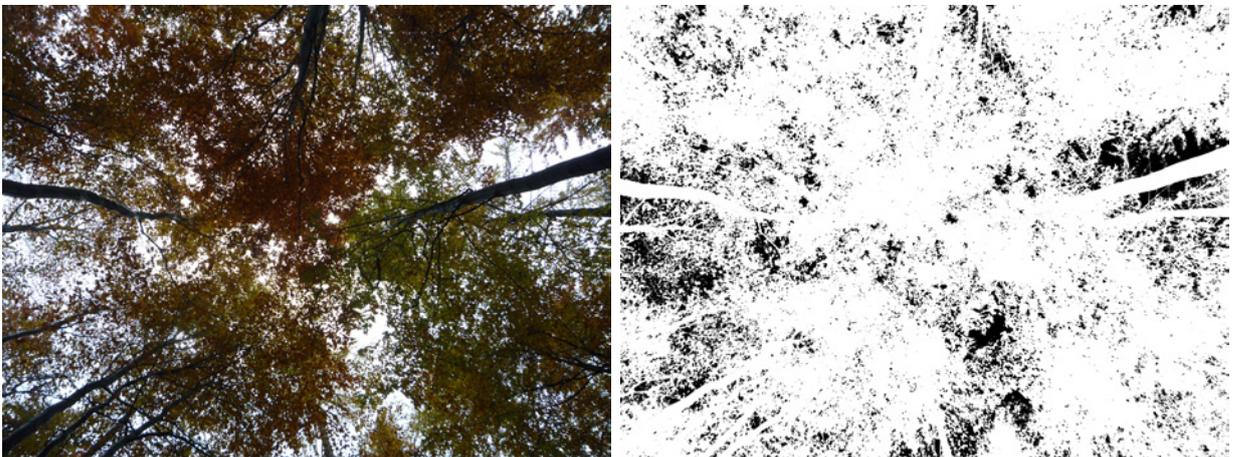


Abbildung 3.16: Klassifizierung der Kronenbilder am Beispiel des Buchenbestand vom 03.11.2009. Originalbild (links) und klassifiziertes Bild (rechts) mit 14 % Himmelanteil.

Die Abbildungen [A.3](#), [A.4](#), [A.5](#) und [A.6](#) im Anhang stellen Beispiele einer unbearbeiteten Fotoreihe für den Buchenbestandes über der Zeit dar.

4 Auswertungsmethodik

4.1 Daten-Aufbereitung

4.1.1 GPS-Daten

4.1.1.1 Verwendete Daten

Die verschiedenen, mit den vier GPS-Empfängern erfassten NMEA-Datensätze (siehe auch Tabelle 3.2) weisen eine Vielzahl an Variablen auf, die teilweise redundante Daten beinhalten. Daher wurden bei der folgenden Datenanalyse die relevanten Informationen je Datenblock ($\hat{=}$ Sekunde) mit dem Programm „GNSS_Analyser“ herausgefiltert und in eine Datenbank abgespeichert (siehe Kapitel 4.1.3).

Grundsätzlich wurde bei der Analyse zwischen positionsbasierten- und Satelliten-Daten unterschieden. Dies ist datenbanktechnisch notwendig, da für jede der mit 1 Hz erhobenen Positionen mehrere Datensätze mit Informationen über die verwendeten bzw. zur Verfügung stehenden Satelliten enthalten sind. Folglich werden diese Informationen getrennt, in verschiedene Tabellen in der Datenbank abgespeichert und mit einer 1:n-Verknüpfung miteinander in Beziehung gesetzt.

4.1.1.1.1 Positionsdaten

Als Positionsdaten werden Daten bezeichnet, die mit einer Frequenz von 1 Hz von den GPS-Empfängern ausgegeben werden. Die meisten Positionsdaten werden hauptsächlich aus den allgemeinen NMEA-Datensätzen „GPRMC“, „GPGGA“, „GPGSA“ und „GPGSV“ gewonnen (vergleiche auch Tabelle 3.2). Darüber hinaus wird auch der herstellerspezifische Datensatz (Garmin) „PGRMF“ für die Gewinnung von Positionsfehlern verwendet. Die tatsächlich verwendeten und folgend in der Datenbank abgespeicherten Positionsdaten sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Dabei ist jeweils der Ursprungs-Datensatz sowie die Auflösung der jeweiligen Variable aufgeführt.

Tabelle 4.1: Verwendete Positions-Informationen der NMEA Datensätze (GARMIN 2005)

Information	Quelle	Beschreibung
Zeit	\$GPRMC	Beschreibt die UTC-Zeit (Auflösung 1Hz, hhmmss)
Datum	\$GPRMC	Beschreibt das UTC-Datum (ddmmyy)
Latitude	\$GPRMC	Beschreibt die geografische Breite im WGS84 ↗118 in Grad (Auflösung von $\frac{1}{10000}min$, ddmm,mmmm)
Longitude	\$GPRMC	Beschreibt die geografische Länge im WGS84 ↗118 in Grad (Auflösung von $\frac{1}{10000}min$, dddmm,mmmm)
Warning	\$GPRMC	Beschreibt den Status der Bestimmung (A = Active/gültig, V = void/ungültig)
Fix-Qualität	\$GPGGA	Beschreibt die Qualität der Messung (0 = ungültig, 1 = GPS, 2 = DGPS)
Höhe Geoid	\$GPGGA	Geoidal separation, der Höhenunterschied zwischen dem WGS-84 Ellipsoid und dem Geoid (Auflösung 10 cm)
High SL	\$GPGGA	Antennenhöhe über Geoid (Auflösung 10 cm)
SatTrack	\$GPGGA	Anzahl der zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten
SatView	\$GPGSV	Anzahl der sichtbaren Satelliten
SecSUd	\$GPGGA	Sekunden seit dem letzten DGPS/RTCM-Update
DGPS Stat.	\$GPGGA	DGPS Stations ID Nummer
Autoselect	\$GPGSA	Auto Selektionstyp von 2D oder 3D fix (M = manuell, A-automatisch)
Fix Mode	\$GPGSA	Fix Typ (0 = kein fix, 1 = 2D fix, 2 = 3D fix)
VDOP	\$GPGSA	VDOP (vertikale Genauigkeit, Auflösung 0,1)
HDOP	\$GPGSA	HDOP (horizontale Genauigkeit, Auflösung 0,1)
PDOP	\$GPGSA	PDOP (3D Genauigkeit, Auflösung 0,1)
H-Error	\$PGRMF	Geschätzter horizontaler Positionsfehler (HPE, Auflösung 10 cm)
V-Error	\$PGRMF	Geschätzter vertikaler Positionsfehler (VPE, Auflösung 10 cm)
Pos-Error	\$PGRMF	Geschätzter Positionsfehler (EPE, Auflösung 10 cm)

4.1.1.1.2 Satellitendaten

Informationen zu den einzelnen Satelliten werden aus dem NMEA-Datensatz „GSV“ gewonnen. Dabei stehen für jeden „gesehenen“ Satelliten neben der Uhrzeit in UTC [↗117](#) die Satellitennummer, die Satellitenstärke sowie die Position (Azimuth, Elevation) zur Verfügung (siehe Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Verwendete Satelliten-Informationen der NMEA Datensätze (GARMIN 2005)

Information	Quelle	Beschreibung
Zeit	\$GPRMC	Beschreibt die UTC-Zeit (Auflösung 1 Hz, hhmmss)
Datum	\$GPRMC	Beschreibt das UTC-Datum (ddmmyy)
Satelliten Nr	\$PGRSV	PRN Nummer des Satelliten
Elevation	\$GPGSV	Höhenwinkel des Satelliten (Auflösung 1 Grad)
Azimuth	\$GPGSV	Horizontalwinkel des Satelliten (Auflösung 1 Grad)
Strength	\$GPGSV	Signal-Rausch-Verhältnis in dB (Auflösung 1 dB)

Die Positionen der einzelnen Satelliten weisen eine Genauigkeit von 1° auf. Dabei beträgt die Spannweite der Elevation $0-90^\circ$ und die des Azimuthwinkels $0-359^\circ$. Theoretisch können Signale von Satelliten auch unter einem Elevationswinkel von 0° empfangen werden (GREIFENEDER 2005). Diese werden jedoch nicht von den GPS-Empfängern ausgegeben. Insgesamt ergeben sich somit $34.201 (= 90 * 360 + 1)$ theoretische Möglichkeiten der Verteilung der Satelliten. Durch die definierten Flugbahnen verringert sich diese Zahl jedoch.

4.1.1.2 NMEA-Parser

Die gespeicherten NMEA-Datensätze der vier GPS-Empfänger wurden mithilfe eines Parsers analysiert, in ihre Variablen zerlegt und für den Import in die Datenbank vorbereitet. Dazu wurde die vom Autor entwickelte und geschriebene Software „GNSS_Analyser“ verwendet (siehe H).

Die Logging-Dateien der verschiedenen Empfänger sind jeweils in einem separaten Verzeichnis angeordnet. Mit der Option „NMEAtoDB“ werden nach der Eingabe eines Verzeichnisses alle sich darin befindlichen GPS-Dateien nacheinander ausgelesen und analysiert (siehe Abbildung 4.1). Nach verschiedenen Optimierungen geschieht dies letztendlich mit einer Frequenz von ca. 5.000 Hz, was bei der vorhandenen Datenmenge als zeitlich vertretbar zu bewerten ist. Bei der Eingabe muss manuell eingestellt werden, um welchen Empfänger es sich handelt und ob Positions- und/oder Satellitendaten exportiert werden sollen.

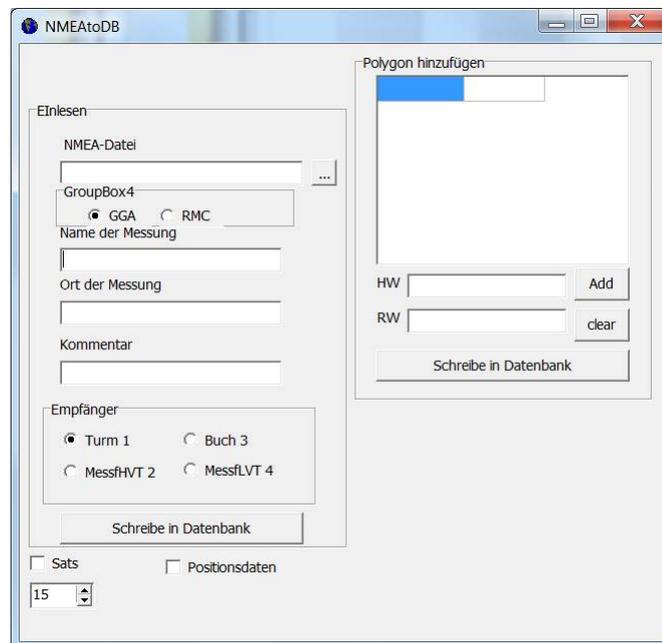


Abbildung 4.1: Ladefunktion der Software „GNSS_Analyser“

Nach langwierigen Tests wurde sich dazu entschieden, die geparsten Daten nicht direkt durch das Programm „GNSS_Analyser“ in die verwendete MySQL-Datenbank schreiben zu lassen.

Der Zeitverbrauch des Schreibprozesses war bei der Gesamtanzahl von einer dreiviertel Milliarde Datensätzen unverhältnismäßig hoch. Besonders, weil aufgrund von Bugs [112](#) in der Software die Werte mehrmals eingelesen werden mussten. Mehrfache Versuche der Optimierung brachten nur unwesentliche Verbesserungen. Daher wurde der Weg über SQL-Befehle gewählt. Das Programm „GNSS_Analyser“ erzeugt dabei aus den gepushten NMEA-Datensätzen optimierte SQL-Befehle (siehe SQL-Anweisung [4.1](#)), welche separat für die Empfänger in jeweils eine Datei geschrieben wurden. Es entstanden dadurch mehrere Textdateien mit einer Größe zwischen 900 MB und 7,8 GB, welche direkt als Befehle in die Datenbank eingelesen wurden.

```
INSERT INTO geodaten.GNSS_daten_1hz
(Datum,Warning,FixQual,HighGeo,HighSL,SatTrack,SatView,SecSinceUpdate,DGPSStatID,
Autosel,FixMode,PDOP,HDOP,VDOP,rw,hw,HError,VError,PosError,GNSS_Empf,Messungs_ID,Zeitpunkt)
Values
('2010-03-16 08:09:08','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117348),
('2010-03-16 08:09:09','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117349),
('2010-03-16 08:09:10','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117350),
('2010-03-16 08:09:11','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117351),
('2010-03-16 08:09:12','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117352),
('2010-03-16 08:09:13','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117353),
('2010-03-16 08:09:14','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117354),
('2010-03-16 08:09:15','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117355),
('2010-03-16 08:09:16','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117356),
('2010-03-16 08:09:17','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117357),
('2010-03-16 08:09:18','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117358),
('2010-03-16 08:09:19','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117359),
('2010-03-16 08:09:20','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117360),
('2010-03-16 08:09:21','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117361),
('2010-03-16 08:09:22','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117362),
('2010-03-16 08:09:23','V',0,0,0,0,12,0,0,'A',1,0,0,0,5399885.14226013,5647377.22234161,0,0,0,3,0,101117363);
```

SQL-Anweisung 4.1: Beispiel für Insert SQL-Anweisung

Die GPS-Daten liegen im Referenzsystem WGS84 [118](#) vor. Diese werden von der erstellten Software „on-the-fly“ mithilfe eines vom Autor implementierten Algorithmus mittels Helmert-Transformation [114](#) in das amtliche Referenzsystem des Freistaates Sachsen: DE RD/83 / GK 3 im 5. Meridianstreifen [116](#) überführt.

Zusätzlich zu den GPS-NMEA-Daten kann die erstellte Software sowohl die GNSS-NMEA-Daten sowie das Topcon Positions System-Protokoll (TPS) [117](#) des Empfängers Topcon Legacy E analysieren und verarbeiten. Bei diesen kommen zusätzlich Informationen über die GLONASS-Satelliten hinzu.

4.1.2 Wetter-Daten

Als zusätzliche Daten wurden von der Professur für Meteorologie der Technischen Universität Dresden die 3D-Winddaten mit einer Auflösung von 1 min und die Wetterdaten (Temperatur, Luftfeuchte, horizontaler Wind, Niederschlag) mit einer Auflösung von 30 min im Excel-Format geliefert. Diese wurden aufbereitet und als CSV-Datei [112](#) exportiert. Nach einer Korrektur verschiedener Satzzeichen (z. B. Punkt-Komma-Problem) wurden die

Wetterdaten mittels der „LOAD INTO INFILE“-Funktion in die Datenbank eingelesen. Die SQL-Anweisung ist in 4.2 für die Tabelle „Wind_1“ dargestellt.

```
LOAD DATA INFILE 'C:/Users/Thomas/Documents/UniGIS/MasterThesis/Daten-
/Wetter/Wind30.csv' INTO TABLE geodaten.Wind_1 FIELDS TERMINATED BY
';' LINES TERMINATED BY '#' STARTING BY '*';
```

SQL-Anweisung 4.2: Beispiel für eine SQL-Anweisung zum Einladen der Winddaten in die MySQL-Datenbank

4.1.3 Datenbank

4.1.3.1 Datenbankstruktur

Ein Knackpunkt der Arbeit war das Handling der Datenmenge. Es liegen mehrere hundert Millionen Datensätze vor. Dabei stellt die Speicherung an sich nicht das Problem dar, sondern die Analyse bzw. der Zeitverbrauch, der bei einer Vielzahl von Analysen auftritt.

Es wurde eine MySQL Datenbank (MySQL Server 5.1.44 -community via TCP/IP) von SUN Microsystems Inc. eingesetzt. Die Datenbank ist frei verfügbar und gilt als eine der schnellsten bei einfachen Tabellenstrukturen. Zur Kommunikation mit der Datenbank wurden die Programme MySQL Administrator (1.2.17), MySQL Query Browser (1.2.17), MySQL Command Line und MySQL Workbench (9.2) der Firma SUN Microsystems Inc. eingesetzt.

Der Hauptteil der Datenbank besteht aus vier Tabellen, wie sie in Abbildung 4.2 dargestellt sind. Dazu gehören die Positionsdaten („gnss_daten_1Hz“), die Satellitendaten („satelliten_1hz“), die hochaufgelösten 3D-Winddaten („Wind_1“) sowie die Wetterdaten („Wetter_30“). Die Verknüpfung der Tabellen der Positionsdaten und der Satellitendaten erfolgt über den kombinierten Schlüssel „Datum“/“GNSS_Empfänger“. Die restlichen Verknüpfungen der vorliegenden Tabellen finden jeweils nur über das Feld „Datum“ statt.

In den vorherigen Kapiteln 4.1.2 und 4.1.1.2 werden die vorhandenen Daten inklusive der Methodik und den Anweisungen dargestellt, wie die beschriebene Datenbank „gefüllt“ wurde.

4.1.3.2 Aggregation der Daten

Die Positions- und Satellitendaten liegen in der Datenbank mit einer Auflösung von 1 Hz vor. Die Wetterdaten dagegen haben eine zeitliche Auflösung von 30 Minuten und die Winddaten eine zeitliche Auflösung von einer Minute. Um die Daten trotzdem miteinander vergleichen zu können wurden die Positions- und Satellitendaten zu einer Frequenz von einer Minute

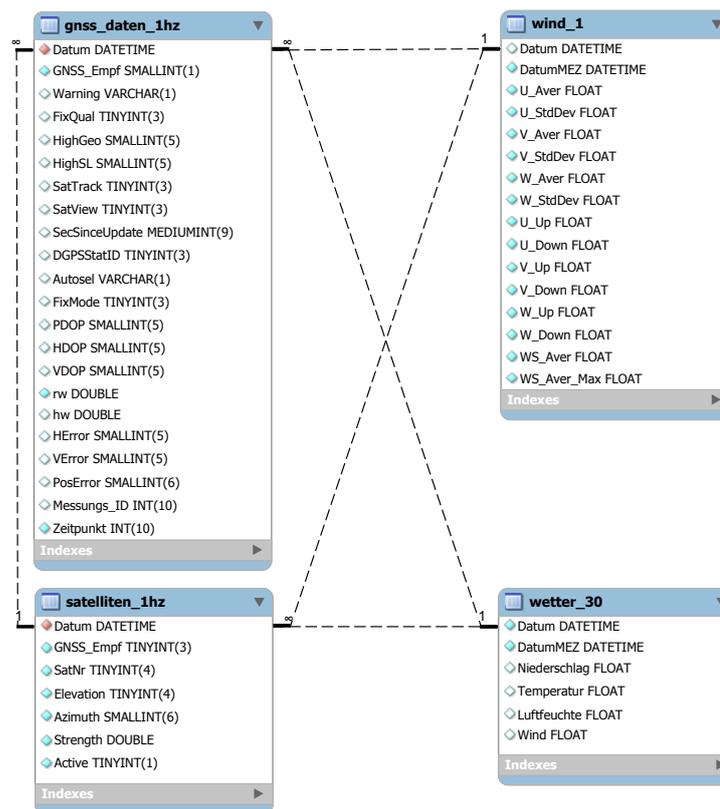


Abbildung 4.2: Grundlegendes EER-Diagramm der Datenbank (ohne weitere Optimierung)

bzw. 30 Minuten aggregiert und in eine separate Tabelle geschrieben. Für die Aggregation wurde der Median verwendet.

Der Median ist in den MySQL-Datenbank-Befehlen nicht integriert. Daher wurde er zusätzlich in die Befehlsreferenz integriert. Dies geschah über User defined functions (UDF). Die Gruppe „mysql-udf“ der OpenSource-Plattform „Sourceforge“ stellt die UDF-Funktions-Quellcodes kostenlos zum Download bereit ([ANONYMOUS 2010](#)). Davon wurde der Median in MySQL integriert.

Der UDF-Befehl des Medians verlangt von den Ausgangsdaten den Datentyp „Real“. Daher wurde jeweils eine Kopie der Satelliten- und Positionstabelle angelegt und die betroffenen Spalten auf „Real“ geändert. Die SQL-Anweisung 4.3 stellt als Beispiel den Befehl der Aggregation dar.

Die Verwendung des Medians wurde dem oft verwendeten arithmetischen Mittelwert vorgezogen, da der Median sehr robust gegenüber Ausreißern und relativ unabhängig von der Verteilung der Stichprobe ist. Als Referenzzeitpunkt wurde jeweils, wie bereits bei den Wetter- und Winddaten geschehen, die aufgerundete Periode (Minute bzw. halbe Stunde) verwendet. Folglich war nun ein Vergleich der GPS-Daten mit den Wetterdaten möglich.

```

create table geodaten.GNSS_daten_1min_median SELECT
DATE_FORMAT(min(g.datum), '%y-%m-%d %H:%i:%s') as 'Datummin',
DATE_FORMAT(max(g.datum), '%y-%m-%d %H:%i:%s') as 'Datummax',
median(g.'HighGeo') as HighGeo, median(g.'HighSL') as HighSL,
median(g.'SatTrack') as Sattrack, median(g.'SatView') as SatView,
median(g.'FixMode') as FixMode, median(g.'PDOP') as PDOP,
median(g.'HDOP') as HDOP, median(g.'VDOP') as VDOP, median(g.'rw')
as RW, median(g.'hw') as HW, median(g.'HError') as HError,
median(g.'VError') as VError, median(g.'PosError') as PosError,
g.'GNSS_Empf' as GNSSEmpf FROM geodaten.gnss_daten_1hz_real g group
by DATE_FORMAT(datum, '%y-%m-%d %H:%i'), gnss_empf;

```

SQL-Anweisung 4.3: Beispiel für die Aggregation der Satellitendaten

4.1.3.3 Optimierung der Datenbank

Es handelt sich um eine abgeschlossene Datenbasis. Dies bedeutet, dass keine weiteren Informationen hinzukommen, da die Untersuchungen beendet wurden. Zur Optimierung der Abfragen wurden daher zusätzliche Tabellen, welche redundante Informationen enthalten, angelegt:

- Es wurde separat für jeden Empfänger Hoch- und Rechswert, in einer eigenen Tabelle mit den Spalten „HW“ bzw. „RW“ sowie dem Datum angelegt und mit Indizes versehen. Dies hat den Vorteil, dass aufwendige Operationen, wie die Bestimmung der Konfidenzintervalle oder des Medians, wesentlich schneller durchgeführt werden.
- Zur Verbesserung der Auswertung wurden weitere sechs Tabellen angelegt. In diesen Tabellen wurden jeweils die Differenzen der Werte der GPS-Empfänger zum selben Zeitpunkt voneinander subtrahiert. Es entstanden dabei die Tabellen $E_{Dach1} - E_{Turm}$, $E_{Buche} - E_{Turm}$, $E_{Dach2} - E_{Turm}$, $E_{Dach1} - E_{Buche}$, $E_{Dach2} - E_{Buche}$, $E_{Dach2} - E_{Dach1}$. Somit ist ein direkter Vergleich der Daten der verschiedenen Empfänger einfach möglich. Darüber hinaus wurden in den neu angelegten Tabellen die Ausreißerwerte (Median \pm 100 m) eliminiert.
- Die Werte VDOP, HDOP, PDOP, VError, HError, PosError haben jeweils eine Auflösung von $\frac{1}{10}$. Daher wurden diese mit 10 multipliziert und als ganzzahlige Werte in der Datenbank abgespeichert. Die Verwendung des Datentyps „SmallInt“ halbiert den erforderlichen Speicherplatz von $2 \frac{\text{Byte}}{\text{Wert}}$ im Gegensatz zum Datentyp „Float“ mit $4 \frac{\text{Byte}}{\text{Wert}}$.
- Die Datenbank wird nach duplikaten Einträgen durchsucht und diese folgend eliminiert.

Darüber hinaus wurden zur Optimierung der Abfragen der verschiedenen Tabellen zahlreiche Indizes angelegt. Als Ergebnis der Optimierung entstand eine Datenbank mit 42 Tabellen, 102 Indizes und einem Gesamtvolumen von ca. 180 GB.

4.1.3.4 Eingesetzte Hardware für die Daten-Aufbereitung und Analyse

Für die verschiedenen Kalkulationen wurde die Datenbank nach der Erstellung und Optimierung insgesamt auf vier Rechnern parallel betrieben, um die Auswertungen gleichzeitig berechnen zu können und um „offline“ arbeiten zu können. Die Leistungsdaten der verwendeten PC-Hardware sind in Tabelle 4.3 dargestellt:

Tabelle 4.3: Verwendete Hardware für die Datenauswertung

„Server“	2x Intel® Core™ 2 DUO CPU	E8400	3,00 GHz	2,0 GB Ram
„Rechenmonster“	8x Intel® Core™ i7 CPU	920	2,67 GHz,	9,0 GB Ram
„Laptop“	2x Intel® Core™ 2 DUO CPU	P9500	2,53 GHz	2,9 GB Ram
„Netbook“	1x Intel® Atom™ CPU	N450	1,66 GHz	1,0 GB Ram

4.1.4 Export von Daten

Viele Analysen wurden nicht direkt in der Datenbank durchgeführt. Es gibt daher mehrere Methoden für den Datenexport:

- **Direkte Verbindung mit der Datenbank**

Diese Option wurde bei der Integration der Daten in das Statistik-Programm SPSS® zum Teil genutzt. Diese Funktion war allerdings nur bei geringen Tabellenlängen möglich. Ab ca. 100.000 Werten stürzte das Programm ab, so dass die Methode über den Export via Query Browser genutzt wurde.

- **Export via MySQL Query Browser**

Nach einer „Select“-Abfrage wird die Ergebnismenge im MySQL Query Browser geladen. Diese lässt sich folgend in mehrere Formate exportieren. Es wurde der MS Excel Export (XML-Format [118](#)) gewählt. Dabei ist zu beachten, dass die Formate folgend darauf kompartibel sind. Beim Datumsformat wurden daher die exportierten Datumswerte mit dem SQL-Befehl „Date_Format(Datum, '%d.%m.%Y %H:%i:%s')“ formatiert.

- **Export mit dem SQL-Befehl „INTO OUTFILE“**

Weiterhin können die Ergebnismengen einer „Select“ Abfrage direkt in eine ASCII-Datei [112](#) geschrieben werden. Dies wurde bei sehr großen zu exportierenden Datenmengen angewandt.

4.2 Analyse

4.2.1 Vorgehensweise

Als statistische Verfahren werden Varianzanalyse, Regression, Korrelation, verschiedene Plots sowie weitere statistische Tests verwendet. Die statistischen Verfahren, Vorgehensweisen und Umsetzungen sind in der Literatur ausreichend beschrieben. Daher soll auf einen Teil der verwendeten Literatur verwiesen werden (BOX & COX 1964; BOX & TWIDELL 1962; FRICKE 2004; JACKE 1980; JANSSEN & LAATZ 2005; SACHS 2004; VENABLES & RIPLAY 2003). In den folgenden Kapiteln sollen jedoch einige Aspekte, die zu beachten sind oder als wichtig erscheinen, kurz angesprochen werden.

4.2.2 Statistische Kennwerte

Lagemaße

In der vorliegenden Arbeit kommen mehrere Methoden für die Bestimmung des Lagemaßes zur Anwendung. Es handelt sich dabei primär um den arithmetischen Mittelwert und um den Median. Bei unterstellter „idealer“ Normalverteilung ist der Median gleich dem arithmetischen Mittelwert. Der arithmetische Mittelwert ist jedoch nicht besonders robust gegenüber Ausreißern, so dass der Median, besonders bei der Verarbeitung unbehandelter Messwerte, eingesetzt wird. Nach der Ausreißerbehandlung liefert auch der Mittelwert ein vertretbares Lagemaß, welches besonders bei der Verwendung von ganzzahligen Werten (z. B. Satellitenanzahl) eine genauere Schätzung abgibt. Wenn keine Normalverteilung zugrunde gelegt werden kann, ist der Median als zentraler 50%-Wert zu bevorzugen. In vorliegender Arbeit werden beide Lagemaße verwendet, wobei die Art des Lagemaßes jeweils explizit dargestellt wird.

Wenn folgend vom Mittelwert geschrieben wird, dann ist damit der arithmetische Mittelwert gemeint, anderenfalls wird dies explizit erwähnt.

Die Differenzen in den Positionen zweier Empfänger, zur Beurteilung der zeitlich direkten Unterschiede, wurden nach Formel 4.1 berechnet.

$$\Delta Pos = \sqrt{((HW_i^a - HW_{abs}^a) - (HW_i^b - HW_{abs}^b))^2 + ((RW_i^a - RW_{abs}^a) - (RW_i^b - RW_{abs}^b))^2}$$

ΔPos		Betrag der Differenz der Positionsabweichung
HW_i^a	$/RW_i^a$	Gemessener Hochwert/Rechtswert des Empfängers a zum Zeitpunkt i
HW_i^b	$/RW_i^b$	Gemessener Hochwert/Rechtswert des Empfängers b zum Zeitpunkt i
HW_{abs}^a	$/RW_{abs}^a$	Absoluter Hochwert/Rechtswert des Empfängers a
HW_{abs}^b	$/RW_{abs}^b$	Absoluter Hochwert/Rechtswert des Empfängers b

Formel 4.1: Berechnung der Positionsdifferenzen zweier Empfänger

Dispersionsmaße

Bei vorhandener Normalverteilung werden die Standardabweichung und das 95%-Konfidenzintervall als Dispersionsmaße verwendet. Dabei repräsentiert die Standardabweichung die einseitige Entfernung, in der bei zweiseitiger Betrachtung 68,3 % der Messwerte (Wendepunkt der Verteilungsfunktion) liegen. Das 95%-Konfidenzintervall, als allgemeines Maß zur Genauigkeitsangabe in der Geodäsie, beschreibt den Bereich, in dem 95 % aller Werte liegen. Dieser wird in vorliegender Arbeit, aufgrund der nicht immer erreichten Normalverteilung, getrennt nach unterer und oberer Schranke dargestellt (zweiseitig), wobei jeweils 2,5 % der Werte außerhalb liegen.

Ausreißerbehandlung

Für die statistischen Auswertungen wird fast ausschließlich empirisches Datenmaterial eingesetzt. Dabei gilt es zu beachten, dass Aussagen, die auf solchen Daten basieren, nur in einem definierten plausiblen Bereich ihre Gültigkeit besitzen. Die vorliegenden Positionsdaten ergeben teilweise Abweichungen von bis zu 2.000 km. Daher wurde eine Ausreißerbehandlung durchgeführt und somit sehr unplausible Werte bzw. Abweichungen, welche z. B. durch Schnee oder Vereisung auftreten konnten, eliminiert. Um jedoch auch reale Schwankungen um den Mittelwert zuzulassen und dabei die Empfänger miteinander vergleichen zu können, wurde sich in vorliegender Arbeit für eine absolute Entfernung und gegen eine relative Entfernung (z. B. dreifache Standardabweichung) entschieden. Dabei werden jeweils separat für Hoch- und Rechtswert alle Werte, die mehr als 100 m von der tatsächlichen Position abweichen, eliminiert. Ein Beispiel ist in der SQL-Anweisung 4.4 dargestellt.

```
CREATE TABLE geodaten.gnss_daten_1hz_rw_Empf3_Korr SELECT * FROM
geodaten.gnss_daten_1hz_rw_Empf3 g where (g.rw<median(g.rw)+100 and
g.rw>median(g.rw)-100);
```

SQL-Anweisung 4.4: SQL-Anweisung zur Eliminierung der Ausreißer

Signifikanztest

Für die Untersuchung von Unterschieden zwischen Stichproben werden folgende statistische Tests angewandt:

- **Normalverteilte Grundgesamtheit**
 - **zwei gepaarte** Stichproben \Rightarrow t-Test,
 - **zwei ungepaarte** Stichproben \Rightarrow t-Test.

- **Nicht-normalverteilte Grundgesamtheit**
 - **zwei abhängige** Stichproben \Rightarrow Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test,
 - **zwei unabhängige** Stichproben \Rightarrow Mann-Whitney-U-Test,
 - **n unabhängige** Stichproben \Rightarrow Kruskal-Wallis-Test (H-Test).

Der Vergleich von Daten der Wettereinflüsse wird u. a. mithilfe einer Korrelationsanalyse untersucht. Der Korrelationskoeffizient wird bei normalverteilten Daten nach Pearson und bei nicht normalverteilten Daten nach Spearman (Rangkorrelationskoeffizient) ermittelt.

Soweit nicht explizit anders erwähnt, wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit (α -Fehler) von $\alpha = 0,05$ angenommen. Die Signifikanzwahrscheinlichkeit eines F-Tests wird mit p bezeichnet.

Test auf Normalverteilung

In der Literatur sind zahlreiche Angaben über die verschiedenen Testmöglichkeiten auf Normalverteilung genannt. Zu deren Überprüfung soll der Test nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test oder KSA-Test) mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors eingesetzt werden. Ein weiterer aussagefähiger und schneller Test auf Verteilung ist die Darstellung der Daten in Häufigkeitsverteilungen bzw. Q-Q-Plots [116](#) und deren optische Beurteilung. Besonders wenn es sich eindeutig um eine Nicht-Normalverteilung handelt, ist dies meist sehr gut zu sehen, vor allem wenn man dafür ein „Gefühl“ entwickelt hat ([DRAPER & SMITH 1981](#); [JACKE 1976, 1980](#)).

4.2.3 Bewertungsindizes

Um den Einfluss der externen Faktoren bestimmen zu können werden mehrere Kennwerte der Messdaten als Indizes verwendet. Dazu gehören das Signal Rausch-Verhältnis, die Positionsabweichung, der Positionsfehler, die DOP-Werte sowie die Anzahl der zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten.

Empirische Positionsabweichung

Die gemessene Positionsabweichung kann mit einer Auflösung von 1 Hz als geeigneter Indikator für die Unterschiede zwischen dem Empfänger und dem Einfluss von externen Faktoren verwendet werden (siehe Kapitel [2.2](#)). Dabei wird die Differenz zwischen der gemessenen und der tatsächlichen Position des jeweiligen GNSS-Empfängers gebildet und jeweils der Betrag verwendet.

$$\overline{Pos} = \frac{\sum_{i=0}^{i=N} \sqrt{(HW_i^a - HW_{abs}^a)^2 + (RW_i^a - RW_{abs}^a)^2}}{N}$$

\overline{Pos}		Mittlerer Betrag der Positionsabweichung
HW_i	$/RW_i$	Gemessener Hochwert/Rechtswert zum Zeitpunkt i
HW_{abs}	$/RW_{abs}$	Absoluter Hochwert/Rechtswert

Formel 4.2: Berechnung Mittlere Positionsgenauigkeit

Signal-Rausch-Verhältnis

Das Signal-Rausch-Verhältnis der einzelnen Satelliten eignet sich als guter Indikator für eine winkelabhängige Einschätzung der Stärke des Signals der jeweiligen Satelliten (siehe Kapitel 2.2). Dabei werden Werte unter 30 dB nicht zur Positionsbildung verwendet.

Positionsfehler bzw. geschätzte Positionsabweichung

Als Positionsfehler werden die von den GNSS-Empfängern ausgegebenen Positionsfehler HPE [114](#), VPE [114](#) sowie der EPE [113](#), welche in Kapitel 2.2 näher beschrieben sind, verwendet. Dabei findet der geschätzte Positionsfehler (EPE) mit einer Auflösung von 10 cm als Indikator die größte Beachtung.

DOP-Werte

Die DOP-Werte („Dilution of Precision“) beschreiben die Verringerung der Genauigkeit durch die Konstellation der zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten (siehe Kapitel 2.2). Die eingesetzten GPS-Empfänger geben drei DOP-Werte aus, wobei dem „Positional DOP“ (PDOP) die größte Bedeutung zukommt. Dabei bedeuten kleinere Werte eine Steigerung der Genauigkeit, was den PDOP zu einem guten Indikator für die Empfangsqualität macht. Optimal ist ein Wert von eins. Werte größer 10 gelten als sehr ungünstig.

Satelliten „in track“

Ein weiterer Index für die Güte der Positionsbestimmung ist die Anzahl der für die Positionsbestimmung verwendeten Satelliten, besonders im Verhältnis zu den theoretisch verfügbaren Satelliten sowie im Vergleich der Empfänger untereinander (siehe Kapitel 2.2).

4.2.4 Verwendete Software

Im Verlauf der Auswertung der erhobenen Daten kam sowohl Standardsoftware als auch vom Autor entwickelte Software zum Einsatz. Die statistischen Analysen und Darstellungen der Ergebnisse erfolgten mittels der Programme SPSS für Windows[®] in der Version 17 sowie Microsoft Office Excel 2007[®]. Die Datenbankerstellung und Bearbeitung erfolgte mit den Produkten Microsoft Office Access 2003[®] und SUN Microsystems MySQL. Die Bildbearbeitung wurde mit Hilfe von Corel Photo Paint[®] durchgeführt, und die Grafikerstellung erfolgte mittels Corel Draw[®]. Die Programmierung der im Zuge der vorliegenden Untersuchung erstellten Programme erfolgte im Borland Development Studio mittels Borland Delphi 2008[®] bzw. Embarcadero Delphi 2010[®]. Diese Softwareprogramme werden im Anhang H näher dargestellt. Weiterhin kamen für die Auswertung und Darstellung der Daten die Programme MATLAB R2010a der Firma MathWorks, Inc. sowie die Programme ArcMap, ArcCatalog, ArcScene der Firma Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI) in den Versionen 9.3 sowie 9.3.1 zum Einsatz. Der Text wurde mit L^AT_EX erstellt.

4.2.5 Erstellung der Skyplots

Als Skyplots wird die Darstellung von Kennwerten über die Satellitenpositionen bezeichnet. Die Positionsdaten werden in Grad angegeben und bei der Projektion auf eine ebene Fläche (Kreis) verzerrt. Daher spiegeln diese den Himmel nicht gleichmäßig wieder. Eingehend darauf sollen drei Arten von Skyplots verwendet werden. Die traditionelle 2D-Darstellung als Kreis, die 3D-Darstellung als Kuppel, und die 2D-Darstellung eines Rechtecks.

4.2.5.1 2D-Skyplot

Bei der Darstellung des 2D-Skyplots sind drei Varianten der Darstellung verwendbar. Abbildung 4.3 stellt die Satellitendaten in einem rechteckigen Skyplot dar. Dabei sind die verschiedenen Azimuth- und Elevationswinkel besonders gut miteinander vergleichbar. Im kreisförmigen Skyplot (Abbildung 4.4) sind die Satellitenpositionen jedoch besser lesbar, da dies eher den realen Verteilung am Himmel entspricht.

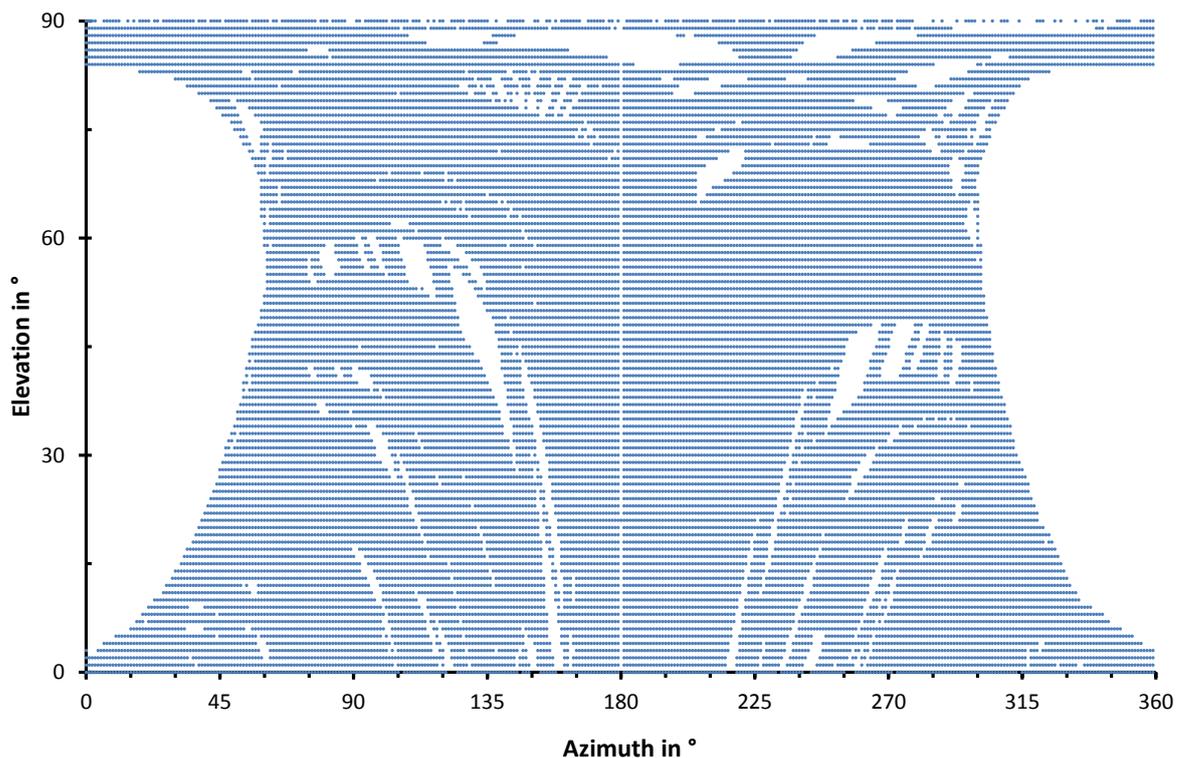


Abbildung 4.3: Beispiel aller aufgenommenen Satellitenpositionen im rechteckigen Skyplot

Die Skyplot-Kreisdarstellungen können grundsätzlich linear verzerrt und unverzerrt dargestellt werden. Viele traditionelle 2D-Skyplot stellen die Satelliten mit einer verzerrten Elevationsachse dar (Abbildung 4.4 links). Dabei geht der Elevationswinkel linear in die Berechnung ein. Formel 4.3 stellt die Ermittlung der X- und Y-Koordinaten dieses 2D-Skyplots dar.

$$x = \text{SIN} \left(\frac{\text{Azimuth} * \pi}{180} \right) * \text{Elevation} \quad (4.3a)$$

$$y = \text{COS} \left(\frac{\text{Azimuth} * \pi}{180} \right) * \text{Elevation} \quad (4.3b)$$

Formel 4.3: Berechnung der verzerrten 2D-Koordinaten der Satelliten

Darüber hinaus kann ein 2D-Skyplot auch unverzerrt dargestellt werden (Abbildung 4.4 rechts). Dies entspricht der senkrechten Draufsicht auf ein 3D-Skyplot. Die Elevationswinkel sind dabei nicht linear an der Ordinate bzw. Abszisse dargestellt. Die Berechnung dieser Koordinaten ist in Formel 4.4 dargestellt, wobei nur die X- bzw. Y-Koordinaten abgetragen werden.

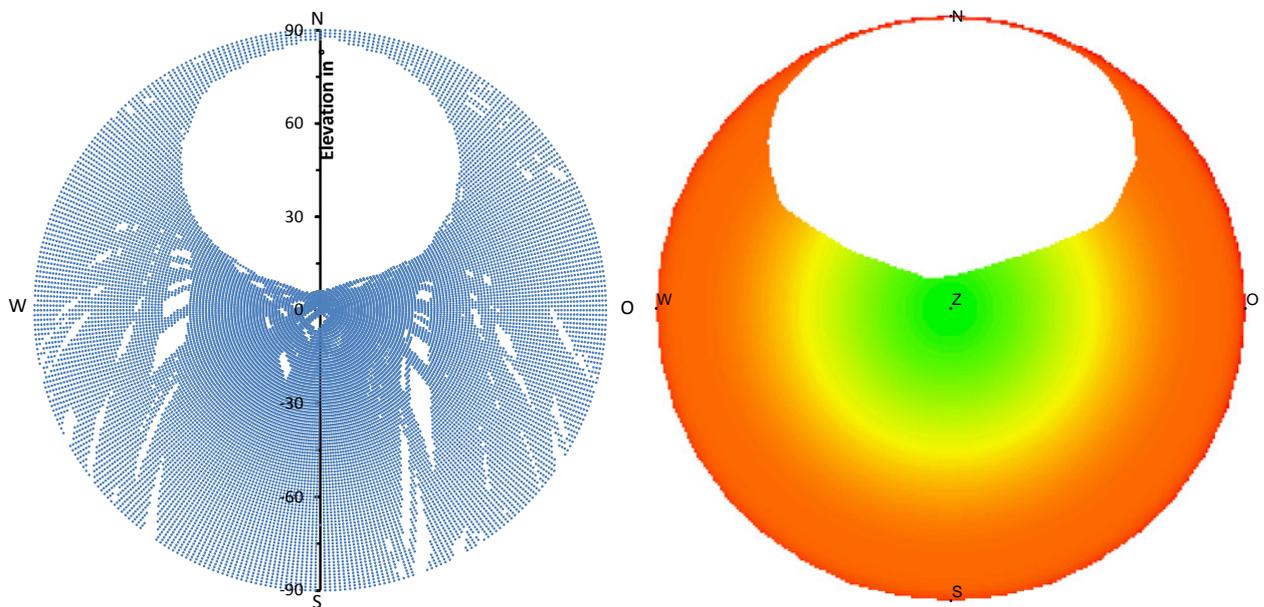


Abbildung 4.4: Beispiele für 2D Skyplots: aufgenommene, verzerrte Satellitenpositionen (links) und interpolierte, unverzerrte Werteoberflächen (rechts)

Ein weiterer Aspekt bei der Darstellung der Skyplots ist die Abbildung der tatsächlichen (Mittel-)Werte oder als interpolierte Oberfläche. Beide sollen in vorliegender Arbeit Verwendung finden (siehe Abbildung 4.4). Die tatsächlichen Satellitenbahnen werden bei dem Skyplot durch die Satellitenstärke der einzelnen GNSS-Empfänger abgetragen (siehe Abbildungen D.3 bis D.7). Als interpolierte Oberfläche kommen die Differenzen der Satellitensignale zwischen den Empfängern besser zur Geltung. Dabei wird das Verfahren des Ordinary Krigings mit den Einstellungen „Fixed Distance = 5“ und „Minimum Points = 5“ gewählt (siehe Abbildungen D.13 bis D.15). Alle 2D-Skyplots werden mit dem Programm ArcMap der Firma ESRI erzeugt.

4.2.5.2 3D-Skyplot

Auch der 3D-Skyplot kann sowohl als Satellitenbahn (Abbildung 4.5 links) als auch als interpolierte Werteoberfläche (Abbildung 4.5 rechts) dargestellt werden.

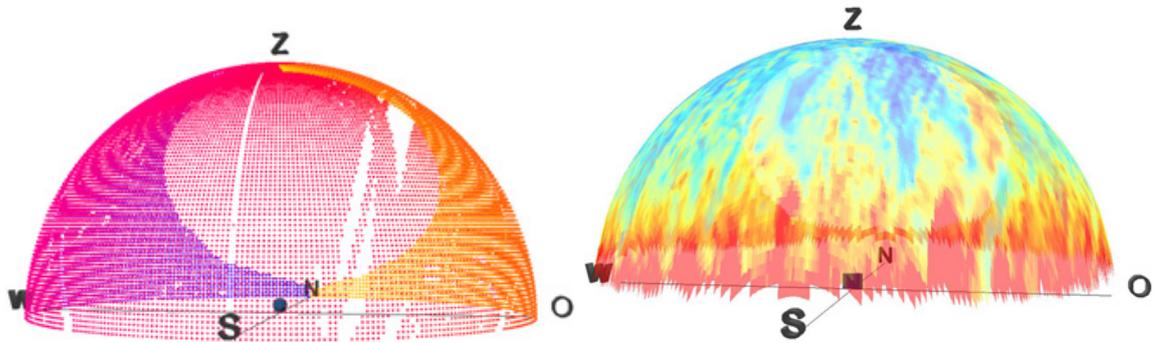


Abbildung 4.5: Beispiele für 3D Skyplots: aufgenommene Satellitenpositionen (links) und interpolierte Werteoberfläche (rechts)

Zur Erzeugung des 3D-Spykplots wird das Programm ArcScene der Firma ESRI eingesetzt. Auf Grundlage der 2D-Skyplots werden die fehlenden Z-Werte bei den Satellitenbahnen direkt über die Formel 4.4c berechnet. Für die interpolierten Oberflächen erfolgt dies indirekt, indem eine ideale (Raster-)Kuppeloberfläche nach der Formel 4.4c erzeugt wird und folgend als Höhenwert für die interpolierte Werteoberfläche dient.

$$x = \text{SIN} \left(\frac{\text{Azimuth} * \pi}{180} \right) * \text{COS} \left(\frac{\text{Elevation} * \pi}{180} \right) * F_s \quad (4.4a)$$

$$y = \text{COS} \left(\frac{\text{Azimuth} * \pi}{180} \right) * \text{COS} \left(\frac{\text{Elevation} * \pi}{180} \right) * F_s \quad (4.4b)$$

$$z = \text{SIN} \left(\frac{\text{Elevation} * \pi}{180} \right) * F_s \quad (4.4c)$$

F_s Skalierungsfaktor im vorliegenden Fall 90
 X Abszisse
 Y Ordinate

Formel 4.4: Berechnung der 3D-Koordinaten der Satelliten

Mit Hilfe des 3D-Skyplots kommt z. B. das vorhandene Nordloch stark zur Geltung. Die reale Verteilung lässt sich darüber hinaus sehr realistisch als 3D-Animation darstellen.

4.2.6 Verbindung der Datenmengen

Für die Datenanalyse wurden die Positions- und Satellitendaten mit den Wetterdaten verschritten. Dafür wurden sowohl die gemessenen Positions- und Satellitendaten verwendet als auch die Differenzdaten von jeweils zwei Empfängern, die über die Zeit miteinander synchronisiert wurden. Je ein Beispiel für die Erzeugung der Differenz ist in den SQL-Anweisungen F.1 und 4.5 dargestellt.

```
CREATE TABLE geodaten.gnss_daten_E2minusE3
SELECT
gd1.datum,
gd1.'HighGeo'-gb.'HighGeo' AS DHighGeo,
gd1.'HighSL'-gb.'HighSL' AS DHighSL,
gd1.'SatTrack'-gb.'SatTrack' AS DSatTrack,
gd1.'SatView'-gb.'SatView' AS DSatView,
gd1.'FixMode'-gb.'FixMode' AS DFixMode,
gd1.'PDOP'-gb.'PDOP' AS DPDOP,
gd1.'HDOP'-gb.'HDOP' AS DHDOP,
gd1.'VDOP'-gb.'VDOP' AS DVDOP,
gd1.'rw'-gb.'rw' AS DRW,
gd1.'hw'-gb.'hw' AS DHW,
gd1.'HError'-gb.'HError' AS DHErrror,
gd1.'VError'-gb.'VError' AS DVErrror,
gd1.'PosError'-gb.'PosError' AS DPosError
FROM geodaten.gnss_daten_1hz gd1 inner join geodaten.gnss_daten_1hz
gb
ON gd1.Datum=gb.datum
WHERE gb.gnss_empf=3 AND gd1.gnss_empf=2
```

SQL-Anweisung 4.5: Beispiel für die Erzeugung von Differenz-Positionsdaten

Die Satelliten- und Positionsdaten liegen mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Hz, die 3D-Winddaten im Minuten-Intervall und die restlichen Wetterdaten im 30-Minuten-Intervall vor. Somit mussten die Daten vor dem Verschneiden auf eine einheitliche Zeitskala konvertiert werden. Dies erfolgte durch die Aggregation der Satelliten- und Positionsdaten. Dabei betragen die Intervallgrößen eine bzw. 30 Minuten (siehe Kapitel 4.1.3.2). Ein Beispiel dafür ist in den SQL-Anweisungen F.4 und 4.3 dargestellt.

Nach der Aggregation können die Daten miteinander verschritten werden. Dies geschah über die „Join“-Funktion, wie dies beispielhaft in der SQL-Anweisung 4.6 beschrieben ist.

Die so entstandenen synchronisierten Daten wurden für die weitere statistische und optische Auswertung verwendet.

```
SELECT *,DATE_FORMAT(g.datum,'%d.%m.%Y %H:%i:%s') as 'Datums'
FROM geodaten.gnss_daten_30min_wetter_e4me1 g INNER JOIN
geodaten.wetter_30 w ON w.datum=g.datum;
```

SQL-Anweisung 4.6: Beispiel für die Verbindung von Postitions- und Wetterdaten

5 Ergebnisse

5.1 Verfügbare Messdaten

Bei allen vier zum Einsatz gekommenen GPS-Empfängern wurden insgesamt ca. 100 Millionen NMEA-Datenblöcke ($\hat{=}$ Sekunden) aufgenommen. Dies entspricht ca. 46 GB an Rohdaten (NMEA-Code als ASCII-Datei abgespeichert). Anschließend wurden die Daten geparsed (siehe 4.1.1.2) und in die Datenbank geschrieben (siehe 4.1.3). Somit stehen knapp eine dreiviertel Milliarde Datensätze (Positions- + Satellitendaten) in der Datenbank für die Auswertung zur Verfügung. Die Datenaufnahme erfolgte über einen Zeitraum von knapp drei Jahren, wobei jedoch aufgrund von Ausfällen und Problemen große zeitliche Unregelmäßigkeiten auftraten. Abbildung 5.1 stellt die Verfügbarkeit der Daten dar.

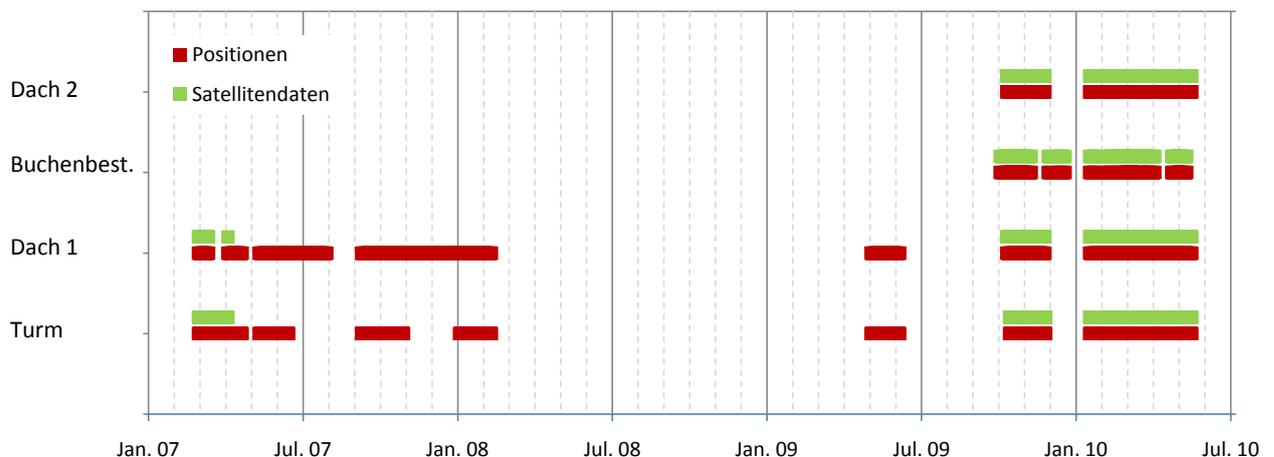


Abbildung 5.1: Zeitliche Darstellung der verfügbaren Empfängerdaten

Wesentliche Probleme für die Unregelmäßigkeiten der Daten sind:

- Die Aufnahmedaten der GPS-Empfänger des Ökologischen Messfeldes wurden, um Datenverlust vorzubeugen, täglich automatisch auf eine zweite Festplatte gespeichert. Beide Festplatten liefen zur Sicherheit je im RAID 1-Modus (=Daten auf vier Festplatten gleichzeitig gespiegelt). Im Frühjahr 2009 ist der Computer auf dem Ökologischen Versuchsmessfeld vermutlich durch einen Blitzeinschlag zerstört worden. Dadurch sind sämtliche Daten auf allen vier Festplatten nicht wiederherstellbar. Es erfolgte keine weitere externe Sicherung. Somit sind diese erhobenen Daten verloren.

- Über einen langen Zeitraum sind keine Satellitendaten vorhanden. Durch ein Konfigurationsproblem im GPS-Empfänger wurde der GSV-Datensatz nicht übermittelt. Dies wurde nicht bemerkt, da nur der Zustand des Datenloggings kontrolliert wurde und eine Auswertung der Daten zu diesem Zeitpunkt noch nicht stattfand. Dieser Fehler wurde in Oktober 2009 behoben. Die Positionsdaten wurden aber korrekt aufgezeichnet.
- Im November 2009 war ein USB-Stick, der die Daten im Buchenbestand aufgezeichnet hat, nicht lesbar.
- Im Dezember 2009 wurden Teile des Computers auf dem Ökologischen Messfeld durch einen Stromausfall zerstört. Somit musste wiederum ein neuer Rechner besorgt und installiert werden, was erst Mitte Januar geschehen konnte.
- Durch einen sehr schneereichen Winter war die Stromversorgung der Buchenfläche mit Batterien nur schwer aufrecht zu halten.

Aufgrund der Probleme reduziert sich die Zahl verfügbarer Messdaten. Darüber hinaus wurden unglaubliche Ausreißerwerte entfernt (siehe Kapitel 4.2.2). Tabelle 5.1 beschreibt die für die Auswertung aufbereitete und letztendlich vorhandene Datenmenge und -zeiträume, getrennt nach Positionsdaten ($\hat{=}$ Sekunden) und Satellitendaten.

Tabelle 5.1: Übersicht über die Daten

		Empfänger 1	Empfänger 2	Empfänger 3	Empfänger 4
		Turm	Dach 1	Buche	Dach 2
Positions- daten	Start	01.03.2007	01.03.2007	05.10.2009	13.10.2009
		14:58:00	14:57:59	13:48:28	06:54:50
	Stopp	20.05.2010	20.05.2010	14.05.2010	20.05.2010
		21:58:35	21:58:25	01:09:18	21:58:35
	Tage	374	470	125	144
	Anzahl	33.383.328	41.715.888	9.922.541	13.451.856
Satelliten- daten	Start	01.03.2007	01.03.2007	05.10.2009	13.10.2009
		14:58:01	14:58:00	13:48:28	06:54:51
	Stopp	20.05.2010	20.05.2010	14.05.2010	20.05.2010
		21:58:35	01:09:18	21:58:25	21:58:35
	Tage	169	182	125	144
	Anzahl	200.878.511	187.658.904	119.070.069	149.735.490

Weiterhin liegen, wie bereits in Kapitel 3.4.4.1 beschrieben, Informationen über das Wetter vor. Dazu gehören die relative Luftfeuchte, die Temperatur, der Niederschlag und die 2D-Windgeschwindigkeit mit einer zeitlichen Auflösung von jeweils 30 Minuten. Ergänzend dazu stehen für den Zeitraum von fünf Monaten 3D-Winddaten mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute für die Auswertung zur Verfügung.

5.2 Positionsgenauigkeit der GPS-Empfänger

Die wichtigste Aufgabe der GNSS-Empfänger ist die Positionsbestimmung. Daher soll sich im folgenden Kapitel mit der Verteilung und Genauigkeit dieser beschäftigt werden. Tabelle 5.2 stellt statistische Positionskennwerte der verschiedenen GPS-Empfänger im Vergleich dar. Dabei sind sowohl die unkorrigierten als auch die korrigierten Werte aufgezeigt. Die Korrektur der Ausreißer erfolgte durch die Eliminierung aller Positionswerte, die eine Entfernung von mehr als 100 m vom Median aufweisen (siehe Kapitel 4.2.2). Im Folgenden wird ausschließlich mit den korrigierten Werten gerechnet.

Tabelle 5.2: Ermittelte Positionen der GPS-Empfänger (Referenzsystem: RD83/5  116)

*Ausreißerwerte von mehr als 100 m Abstand zum Median wurden entfernt

	Name	Empf. 1 Turm	Empf. 2 Dach 1	Empf. 3 Buchen	Empf. 4 Dach 2
R	Arithm. Mittelwert	5.399.344,17	5.399.331,77	5.399.889,61	5.399.330,44
E	Minimaler Wert	5.399.170,32	5.397.633,77	540.258,56	5.398.429,16
C	Maximaler Wert	5.402.089,96	5.400.743,64	6.470.183,81	5.399.863,28
H	Standardabweichung	3,34	6,25	1603,52	5,13
T	Median GPS 16	5.399.344,06	5.399.331,92	5.399.884,10	5.399.330,63
S	Median Legacy E	5.399.344,46	5.399.331,96	5.399.884,21	5.399.330,94
W	Arithm. Mittelwert korr.*	5.399.344,02	5.399.331,77	5.399.883,93	5.399.330,45
E	Standardabweichung korr.*	1,96	5,34	5,69	4,73
R	Ausreißer absolut	779	3.931	62.000	822
T	Ausreißer relativ	0,0023 %	0,0094 %	0,62 %	0,00611 %
H	Arithm. Mittelwert	5.648.457,77	5.648.470,36	5.647.395,31	5.648.466,73
O	Minimaler Wert	5.647.735,84	5.645.250,60	5.646.489,50	5.646.879,30
C	Maximaler Wert	5.655.696,56	5.650.154,65	7.875.455,30	5.651.042,77
H	Standardabweichung	7,82	9,96	856,37	8,64
W	Median GPS 16	5.648.457,82	5.648.469,86	5.647.374,03	5.648.466,41
E	Median Legacy E	5.648.457,56	5.648.469,95	5.647.374,01	5.648.466,25
R	Arithm. Mittelwert korr.*	5.648.457,74	5.648.470,32	5.647.374,36	5.648.466,73
T	Standardabweichung korr.*	2,50	9,57	9,42	7,02
	Ausreißer absolut	3.953	10.892	66.818	2.324
	Ausreißer relativ	0,012 %	0,026 %	0,67 %	0,017 %

Lagemaße

Der korrigierte Mittelwert, der Median und die Vermessung mit dem geodätischen GNSS-Empfänger unterscheiden sich nur geringfügig. Die Differenzen liegen teilweise nur im Zentimeterbereich. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Median als zentrale 50 %-Masse als reale Position herangezogen werden kann. Folglich wird dieser im weiteren Verlauf als Position verwendet.

Ausreißer

Die Anzahl der Ausreißer unterscheidet sich stark zwischen den verschiedenen GNSS-Empfängern, wobei der Buchenbestand mit ca. 65.000 Ausreißern eine deutliche Spitzenstellung einnimmt. Dies kann zum Teil durch eine Abdeckung nach Schneefall sowie durch die Vereisung des Empfängers während der Wintermonate erklärt werden. Die geringste Ausreißer-Anzahl weist der GNSS-Empfänger auf dem Messturm mit maximal 0,012 % der Werte auf. Somit ist die Erhöhung der Anzahl der Werte außerhalb des 100-m-Quadrates auf die Existenz des Kronendaches und deren störenden Einfluss zurückzuführen.

Abgesehen vom Buchenbestand erreicht der Hochwert ca. dreimal so oft die Ausreißerschwelle von 100 m als der Rechtswert. Die plausibelste Erklärung liegt in der Satellitenverteilung (Nordloch [☞115](#)) und der damit öfters ungünstigeren Nord-Süd-Ausrichtung dieser (siehe Abbildung 4.3). Dies bestätigen auch die unkorrigierten 2D-Häufigkeitsplots der Positionen, wie sie in den Abbildungen 5.2 sowie C.3 und C.4 dargestellt sind. Die Ausreißer befinden sich durch Störungen meist über längere Zeit außerhalb der tatsächlichen Position bzw. „springen“ zu einer unplausiblen Position und „wandern“ folgend langsam wieder zur tatsächlichen Position zurück. Es entstehen in der Abbildung tentakelartige Gebilde.

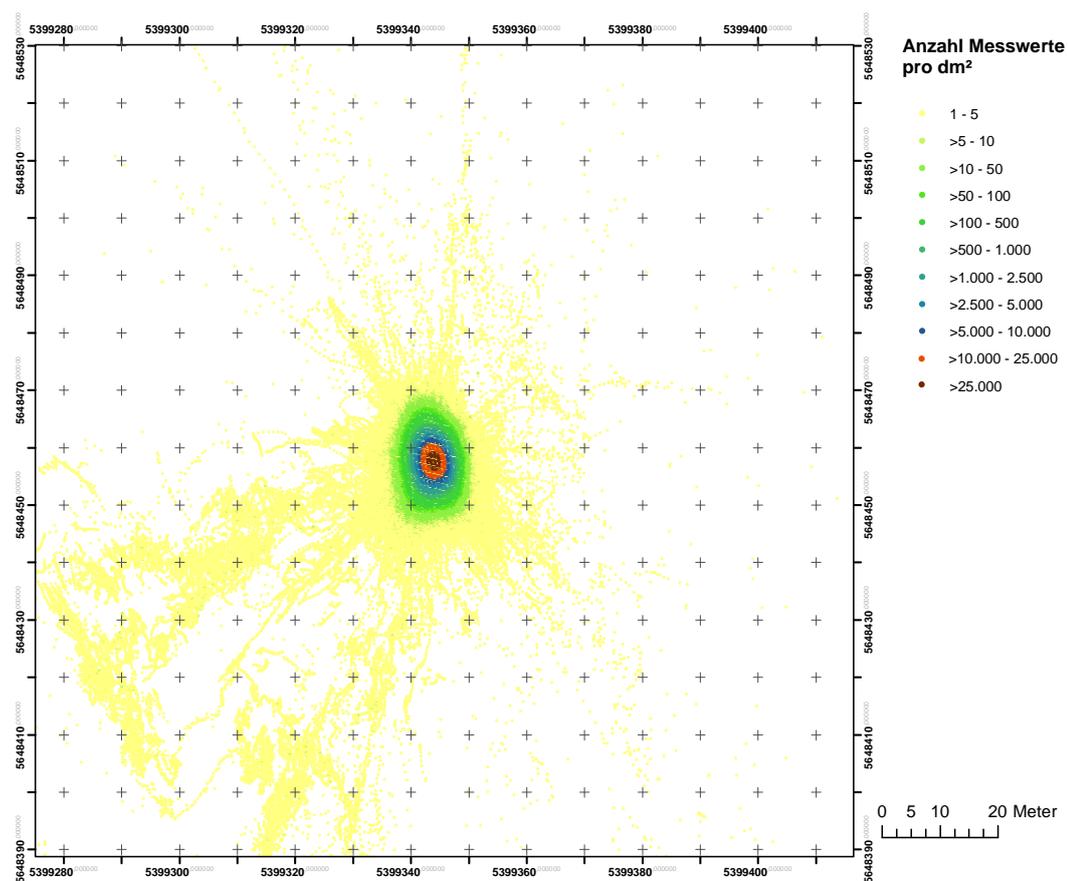


Abbildung 5.2: 2D-Positionsdaten des GNSS-Empfängers auf dem Turm

Dispersionsmaße

Die Originalwerte streuen sehr stark. Es ist aber bei der Standardabweichung ein ähnliches Bild wie bei der Ausreißeranzahl zu erkennen. Die Empfänger unterscheiden sich deutlich. Tabelle 5.3 stellt die korrigierte Standardabweichung und den 95 %-Vertrauensbereich dar. Der Empfänger 1 (Turm) erreicht dabei mit einer Standardabweichung von 1,96 m bzw. 2,50 m die besten Resultate. Alle drei Empfänger, die unter dem Kronendach stehen, erreichen Werte zwischen 7,7 m bis 9,6 m. Dies entspricht der ca. drei- bis vierfachen Streuung des unüberschirmten Empfängers. Alle Unterschiede sind hoch signifikant ($p=0,000$). Der Einfluss der Bäume ist somit als extrem hoch und relevant einzuschätzen. Er verringert, im vorliegenden Versuch, die (langzeit statische) Genauigkeit auf ca. $\frac{1}{3}$ der Werte ohne Wald.

Tabelle 5.3: Streuung der Positionen in m

	Name	Turm	Dach 1	Buche	Dach 2
Hochwert	95 %-Intervall (einseitig, positiv)	4,34	17,71	21,34	14,67
	95 %-Intervall (einseitig, negativ)	4,59	14,07	16,20	12,14
	95 %-Intervall (zweiseitig)	8,93	31,78	37,54	26,82
	Standardabweichung	1,96	5,34	5,69	4,73
Rechtswert	95 %-Intervall (einseitig, positiv)	2,91	9,54	11,05	8,38
	95 %-Intervall (einseitig, negativ)	3,10	10,54	10,97	9,80
	95 %-Intervall (zweiseitig)	6,01	20,08	22,01	18,18
	Standardabweichung	2,50	9,57	9,42	7,02
Vektorbetrag	95 %-Intervall (zweiseitig)	5,81	23,43	27,15	19,65
	Standardabweichung	2,11	6,68	7,63	5,61

Die aufgeführten Standardabweichungen werden über alle Messwerte der einzelnen Empfänger gebildet. Dabei werden die durch externe Faktoren ausgelösten, teilweise hohen Schwankungen kompensiert. Die dargestellten Werte für Einzelmessungen sind daher als teilweise überschätzt anzunehmen. Diese Aspekte werden in Kapitel 5.4 näher untersucht. Anschauliche Beispiele stellen die Abbildungen C.2 und 5.3 dar.

Empfänger 2 (Dach 1) und Empfänger 4 (Dach 2) unterscheiden sich in der Standardabweichung nicht signifikant. Für die Signifikanzanalyse wurden nur die parallel aufgenommenen Zeiten berücksichtigt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Abbildung C.2 stellt dies anschaulich dar. Die täglichen Standardabweichungen der beiden Empfänger verlaufen fast parallel. Die dabei aufgetretenen starken Fluktuationen lassen sich nur durch externe Faktoren begründen, auf die in Kapitel 5.4 näher eingegangen werden wird.

Die tägliche Standardabweichung des Empfängers 4 (Buche) ist signifikant schlechter als die der anderen drei Empfänger. Die Überschildung des Laubholzbestandes hat somit einen größeren negativen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit. Ob dies sowohl im belaubten als auch im unbelaubten Zustand gleich ist, soll im Kapitel 5.4.3 geklärt werden.

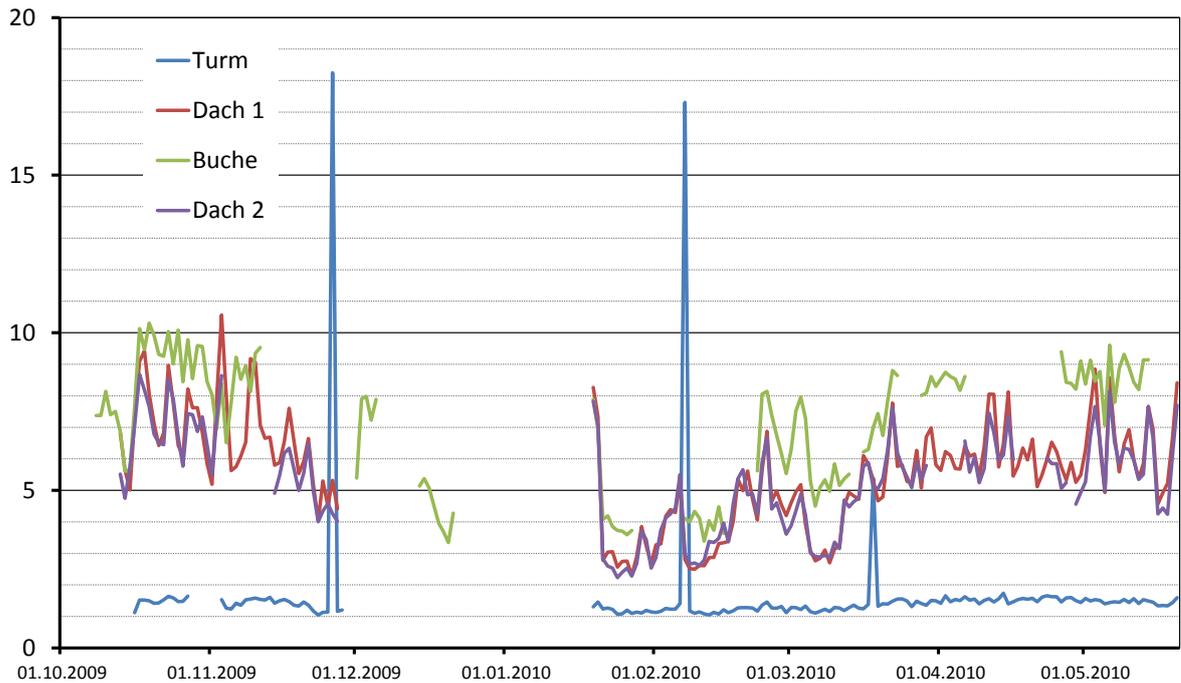


Abbildung 5.3: Standardabweichung GNSS-Empfänger im Verlauf der Zeit in m

Als weiteres Maß für die Streuung wird das Konfidenzintervall verwendet. Dieses ist zusammen mit der Standardabweichung für die vier Empfänger unterschieden und nach den verschiedenen Himmelsrichtungen in Abbildung 5.4 dargestellt. Analog zur Ausreißerbewertung streuen die Dispersionsmaße in Nord-Süd-Richtung stärker als in Ost-West-Richtung.

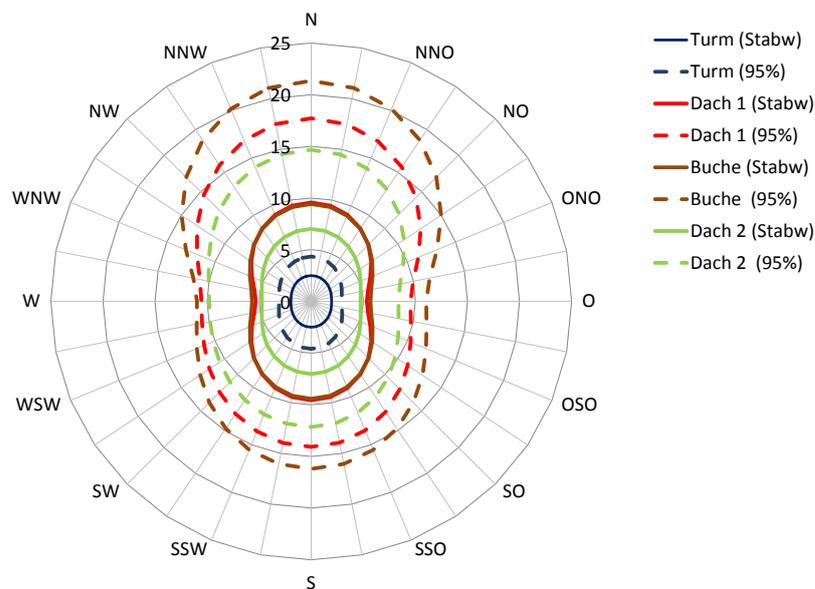


Abbildung 5.4: Dispersionsmaße der GPS-Empfänger nach Himmelsrichtung in m

95 % aller gemessenen Werte liegen beim GNSS-Empfänger auf dem Turm in einem Kreis von 5,81 m, was die Herstellerangabe von <15 m deutlich unterschreitet. Eine Erklärung ist die hohe Zahl der Messwerte, welche zeitlich lokale Schwankungen kompensieren. Die überschilderten Empfänger 2-4 erreichen Genauigkeiten von 19,7 m bis 27,2 m, was über der Herstellerangabe liegt.

Die im Betrag etwa gleichen positiven und negativen Abweichungen des einseitigen 95 %-Vertrauensbereiches (siehe Tabelle 5.3) deuten auf eine weitestgehende Normalverteilung der Positionsdaten hin. Abbildung 5.5 bestätigt diese Annahme deutlich. Somit kann für die weiteren Betrachtungen der Mittelwert der Positionsdaten verwendet werden.

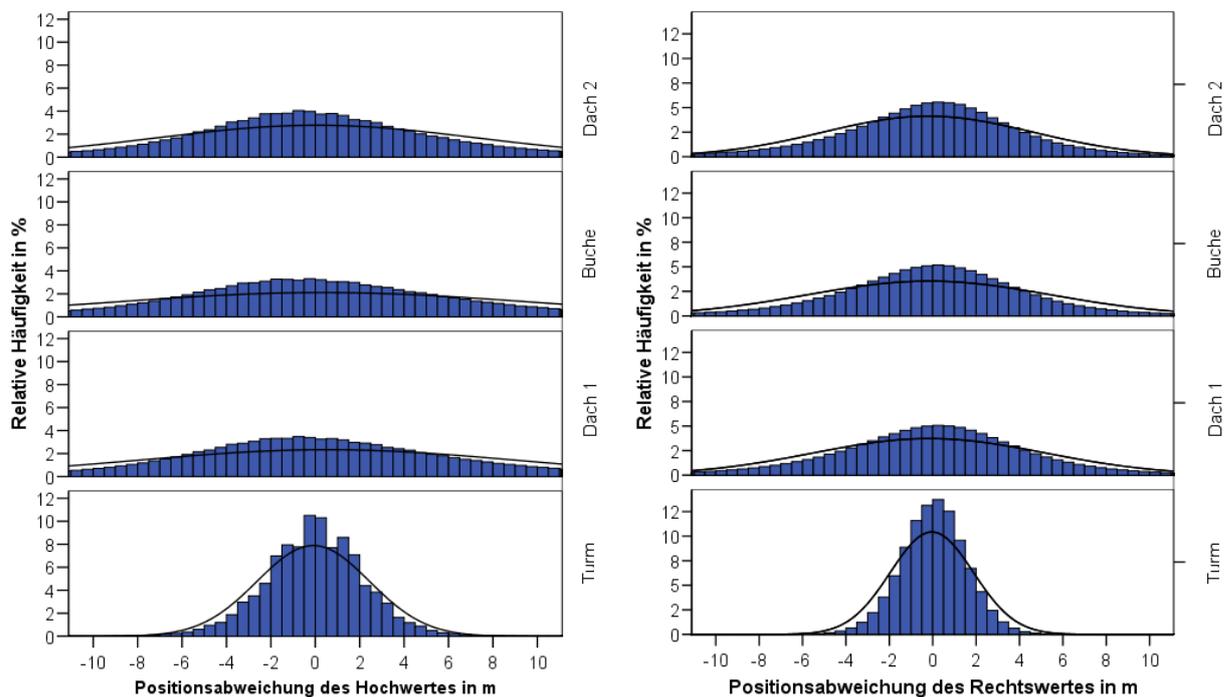


Abbildung 5.5: Histogramm der Positionsgenauigkeit

5.3 Empfangssituationen der Satelliten

Die Empfangssituation der Satelliten mit und ohne Überschildung wird über das Satelliten-Rausch-Verhältnis interpretiert. Abbildung 5.6 stellt die Verteilung der Satellitenstärken der einzelnen Empfänger dar. Deutlich ist, dass ungestörte Verhältnisse, wie sie auf dem Referenzempfänger (Turm) auftreten, signifikant stärkere Signale aufweisen als bei den drei überschilderten Empfängern. Somit ist eine klare Beeinflussung der Signalstärke durch das Kronendach zu verzeichnen. Der Empfänger im Laubholzbestand empfängt dabei die Satellitensignale am schlechtesten.

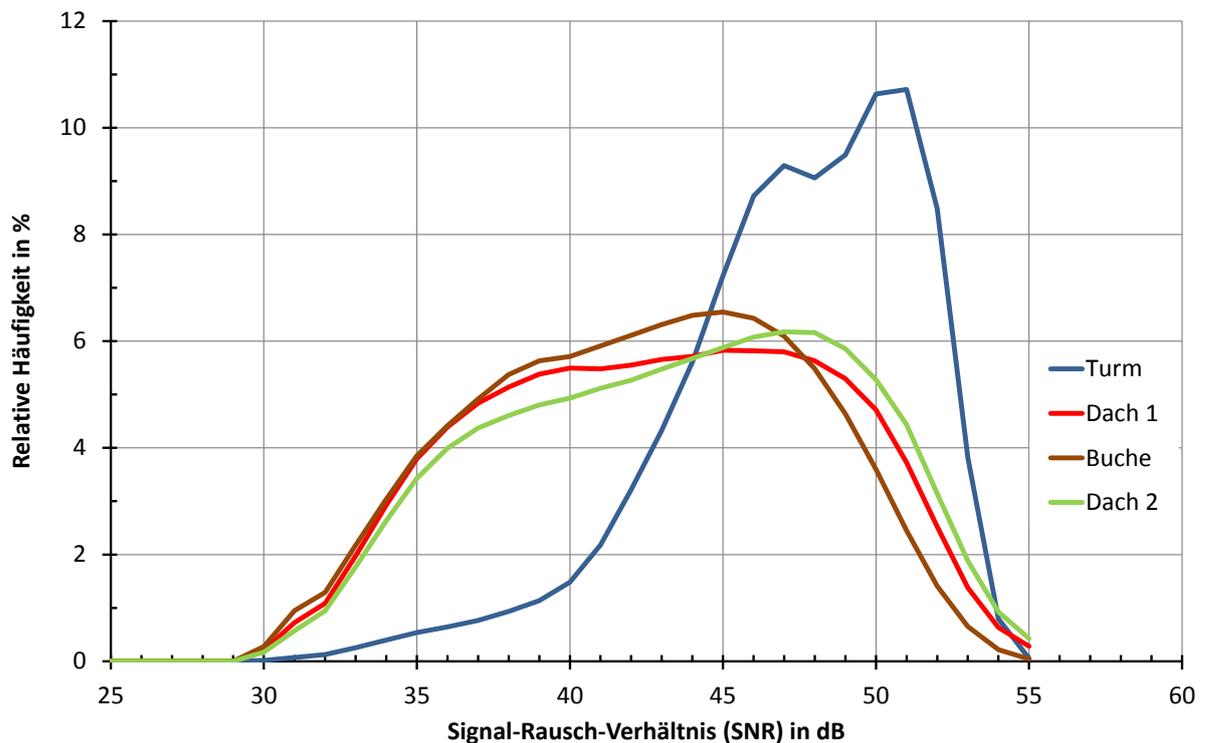


Abbildung 5.6: Signal-Rausch-Verhältnis der Gesamtdaten der vier Empfänger

Auch der Anteil der nicht zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten ($\text{SNR}=0$ [117](#)) ist bei den verschiedenen Empfängern unterschiedlich. Dabei weist der GPS-Empfänger auf dem Turm mit 3,5 % deutlich geringere Werte auf als die GPS-Empfänger Dach 1 (29,4 %), Buche (38,0 %) und Dach 2 (29,2 %).

Der verwendete GPS-Empfänger hat die Eigenschaft, die Signale unter einer Stärke von 30 dB nicht zu verwenden. Er gibt diese Satelliten mit einem Rausch-Verhältnis von 0 dB an. Dieser Sprung in der sonst metrischen Skala verfälscht statistische Parameter. Darüber hinaus ist jedoch die Information wichtig, dass der Satellit nicht verwendet wurde. Diesem Widerspruch wird begegnet, indem zwei statistische Rechnungen durchgeführt wurden, mit und ohne der Verwendung des 0-Wertes. So sind in den Abbildungen [D.3](#) bis [D.7](#) die mittleren Stärken der empfangenen Signale mit dem Wert Null und in den Abbildungen [D.8](#) bis [D.12](#)

die mittleren Stärken der empfangenen Signale ohne den Wert Null berechnet worden.

Die Satelliten sind nicht gleichmäßig über den Horizont verteilt. Durch die Bahnneigung kommt es zur Bildung des Nordlochs und zu einer ungleichmäßigen Abdeckung des Himmels. Darüber hinaus schwächen sich die Satellitensignale ab, je tiefer der Satellit über dem Horizont steht. Abbildung 5.7 stellt die empfangene Satellitenstärke in Abhängigkeit des Elevationswinkels, mit Ergänzung der relativen Häufigkeiten dar.

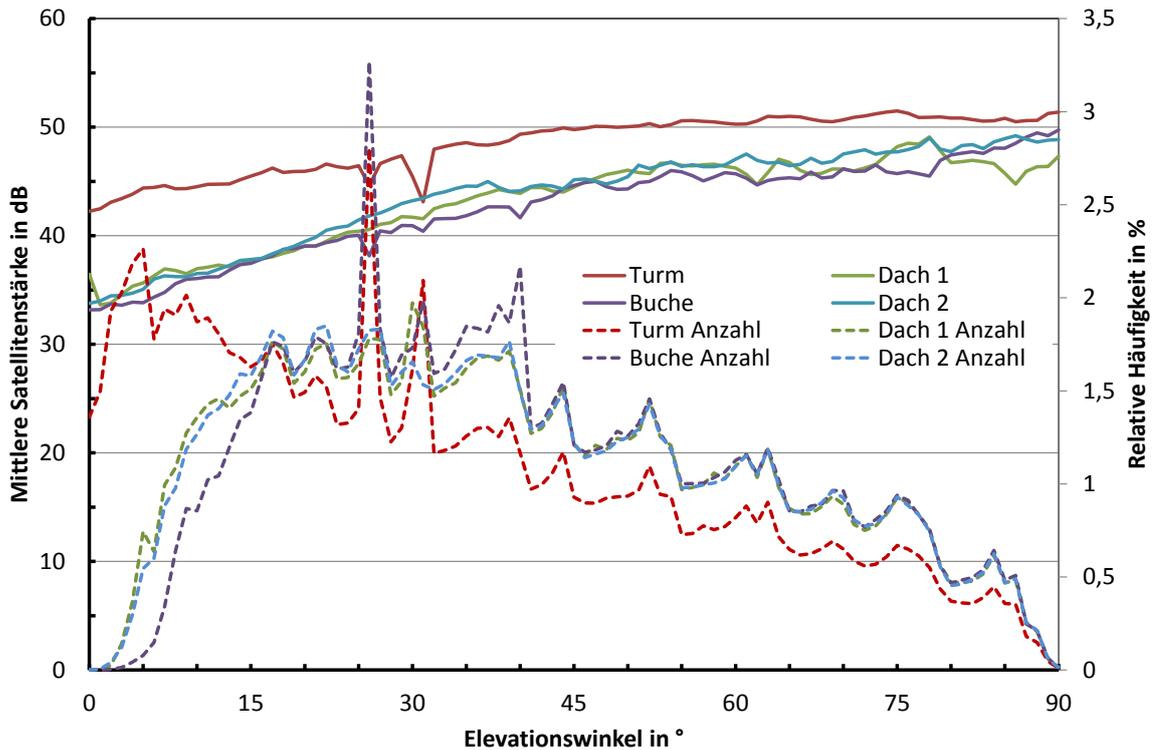


Abbildung 5.7: Mittleres Signal-Rausch-Verhältnis bei unterschiedlichen Elevationswinkeln (Es werden nur Satelliten mit einer Stärke ≥ 30 dB berücksichtigt)

Das mittlere SNR [117](#) nimmt leicht mit dem Elevationswinkel zu und stellt eine für jeden Empfänger typische Kurve dar. Im Zenit weist diese die höchsten Werte auf. Dabei liegen alle überschilderten Empfänger unter denen der Referenz (Turm). Dies verdeutlicht den Einfluss der Baumkronen. Der Abstand zwischen der Referenz und den überschilderten Empfängern nimmt zum Zenit hin ab und bestätigt die Annahme, dass das Satellitensignal bei kleinerem Elevationswinkel eine längere Strecke durch die Krone zu absolvieren hat und als Folge diese mehr abschwächt als bei der Referenz ohne Hindernis.

Die meisten Satelliten treten in einem Winkel zwischen 15° und 45° auf. Die Referenz (Turm) weist dagegen auch hohe Werte unter 15° auf, da diese nicht durch einen Bestand abgeschirmt werden. Weiterhin steigt bei den überschilderten GPS-Empfängern unterhalb eines Elevationswinkels von 15° die Anzahl der Satelliten mit einem SNR von 0 dB stark an.

Abbildung 5.8 stellt die Verteilung des SNR über dem Azimuthwinkel dar. Dabei wird die

Wirkung der fehlenden Satelliten am nördlichen Himmel und die damit verbundene ungleichmäßige Verteilung deutlich. In manchen Bereichen kommt es zu einer sehr starken Konzentration der Satelliten, da sich die Satellitenbahnen an diesen Punkten stark überschneiden.

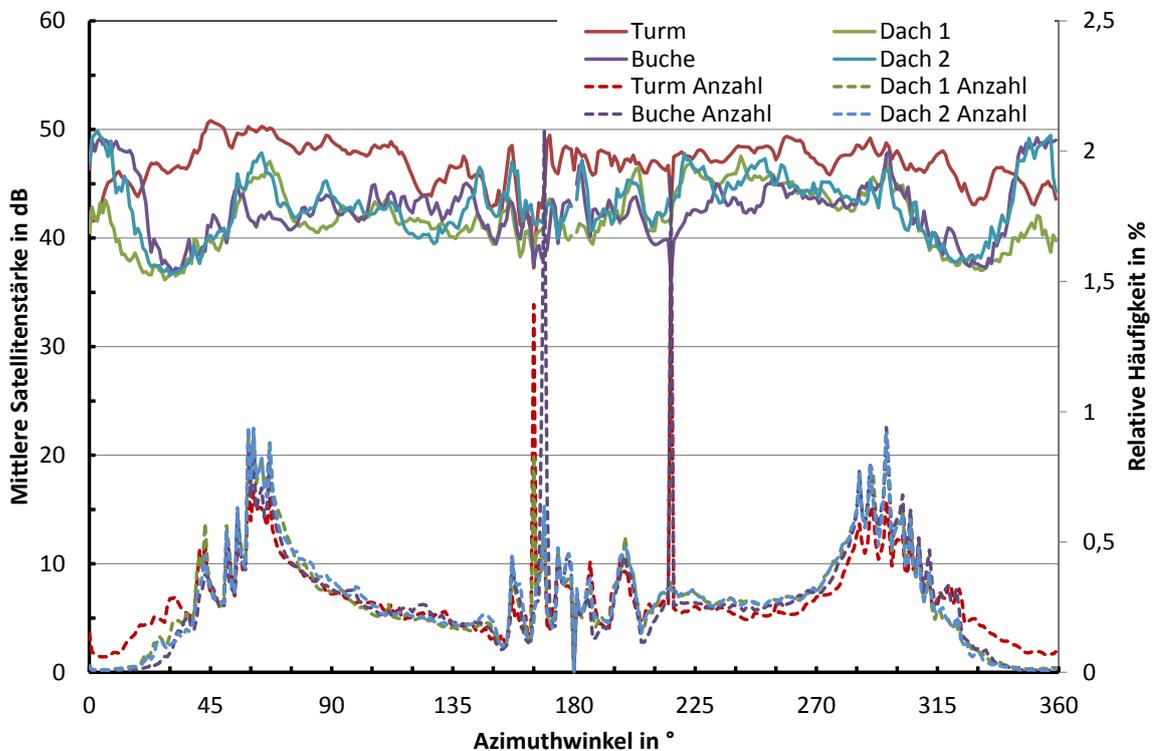


Abbildung 5.8: Mittleres Signal-Rausch-Verhältnis bei unterschiedlichen Azimuthwinkeln
(Es werden nur Satelliten mit einer Stärke ≥ 30 dB berücksichtigt)

Die SNR-Werte der Referenz liegen wiederum oberhalb der drei überschilderten Empfänger. Eine Ausnahme bildet der Norden, wobei es durch die geringe Anzahl an Messwerten zu statistischen Verfälschungen kommt. Darüber hinaus ist die Stärke der Satelliten besonders im direkten Süden bei allen vier Empfängern ähnlich stark.

Abbildung 5.9 stellt die Kennwerte des mittleren SNR-Wertes im Verlauf der Zeit dar. Diese wurden durch die arithmetische Mittelwertbildung aller SNR-Werte > 29 dB und einem Elevationswinkel von mindestens 15° bzw. 30° berechnet.

Die Referenz (Turm) schwankt nur geringfügig und weist in allen Fällen ein relativ kostantes Niveau der SNR-Werte auf. Bei den überschilderten Empfängern hingegen ist ein leichter Trend zu erkennen, der vom Herbst 2009 zum Winter zunimmt und zum Sommer 2010 hin wieder etwas geringere SNR-Werte darstellt. Der Trend ist bei den drei Empfängern in etwa gleich. Somit kann es sich nur um einen systematischen Einfluss eines externen Faktors handeln, der bei den überschilderten GPS-Empfängern vorhanden, bei der Referenz jedoch fehlt. Als Möglichkeiten kommen die Temperatur sowie die Überschildung in Frage. Der Verlust bzw. Gewinn von Blättern ist daher auch wahrscheinlich. An dieser Stelle sollte da-

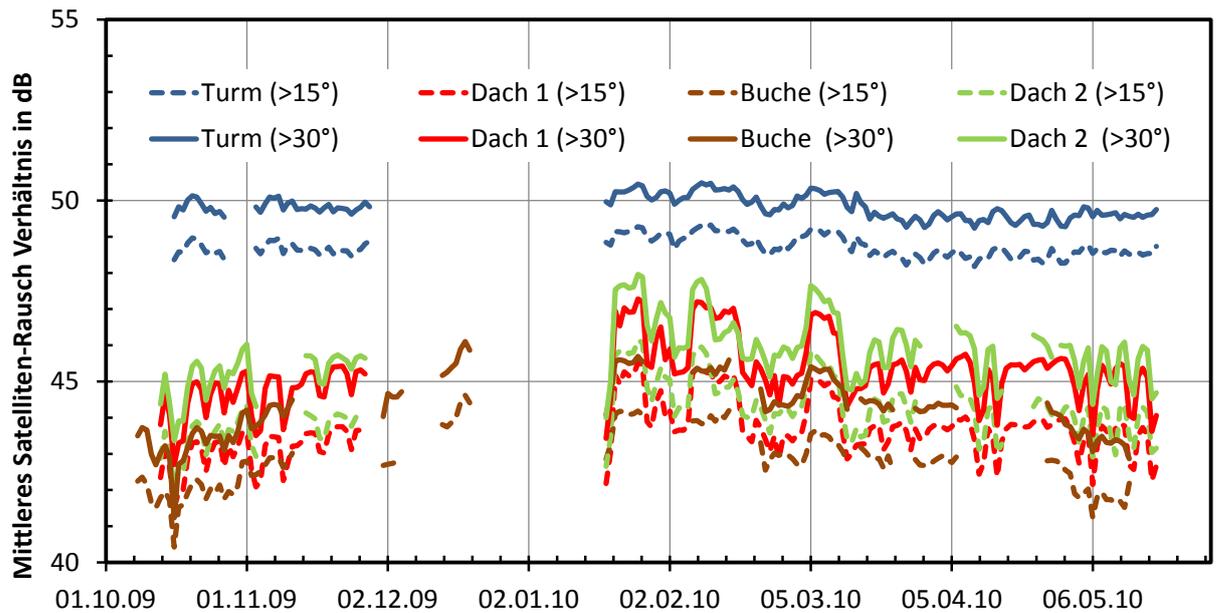


Abbildung 5.9: Mittleres Satelliten-Rausch-Verhältnis im Verlauf der Zeit
(Mittelwert aller Werte Elevation $\geq 30^\circ$ bzw. $\geq 15^\circ$ und SNR ≥ 30 dB)

bei nicht vergessen werden, dass auch Nadelbäume einem Nadelverlust im Herbst und einem Nadelgewinn (Austrieb) im Frühjahr unterliegen, obwohl diese jeweils ca. 4-5 Nadeljahrgänge (Gemeine Fichte) behalten. Somit kann die vorliegende synchronisierte systematische Schwankung erklärt werden. Auf dieses Phänomen wird in den weiteren Kapiteln näher eingegangen.

Abbildung 5.10 stellt das mittlere Satelliten-Rausch-Verhältnis und deren Standardabweichung im 2D-Skyplot dar.

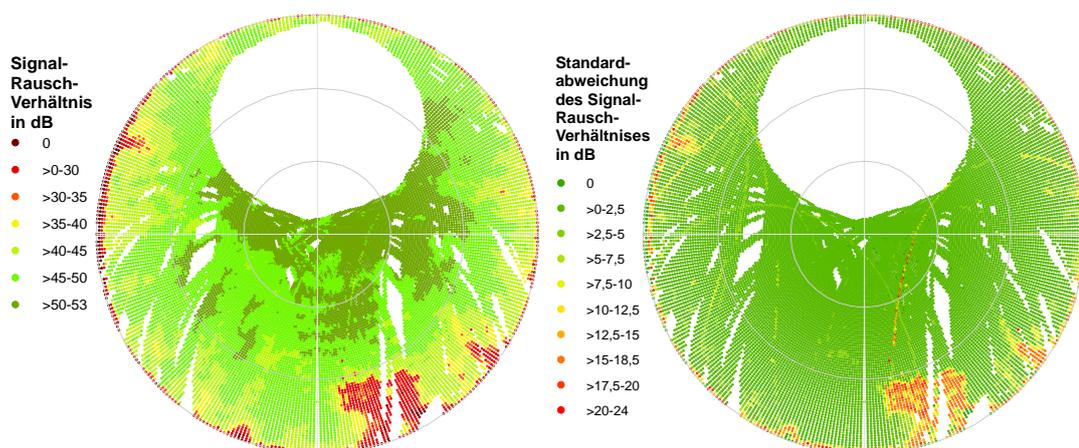


Abbildung 5.10: Satelliten-Rausch-Verhältnis des Empfängers 1 (Turm) in dB
(links: mittleres SNR, rechts: Standardabweichung des SNR)

Die SNR-Werte der Referenz sind, wie anzunehmen war, relativ homogen über den Himmel verteilt. Lediglich bei niedrigen Elevationswinkeln nimmt die Stärke der Signale ab. Besonders die Schwankungen des Signal-Rausch-Verhältnisses, welche durch die Standardabweichungen des SNR repräsentiert werden, sind sehr gering und über den gesamten Himmel weitestgehend homogen. Ein Bereich intensiver Störung ist bei niedrigen Elevationswinkeln im Süden deutlich zu erkennen. Dieser ist versuchsbedingt. Durch das Vorhandensein von metallischen Halterungen für andere Messgeräte kommt es in diesem Bereich zu starken Abschattungen der Satellitensignale (siehe Abbildung 3.8).

Abbildung 5.11 stellt die Standardabweichung und die mittleren SNR-Werte des Empfängers 2 (Dach 1) dar. Der Gegensatz zur Referenz (Abbildung 5.10) ist deutlich erkennbar.

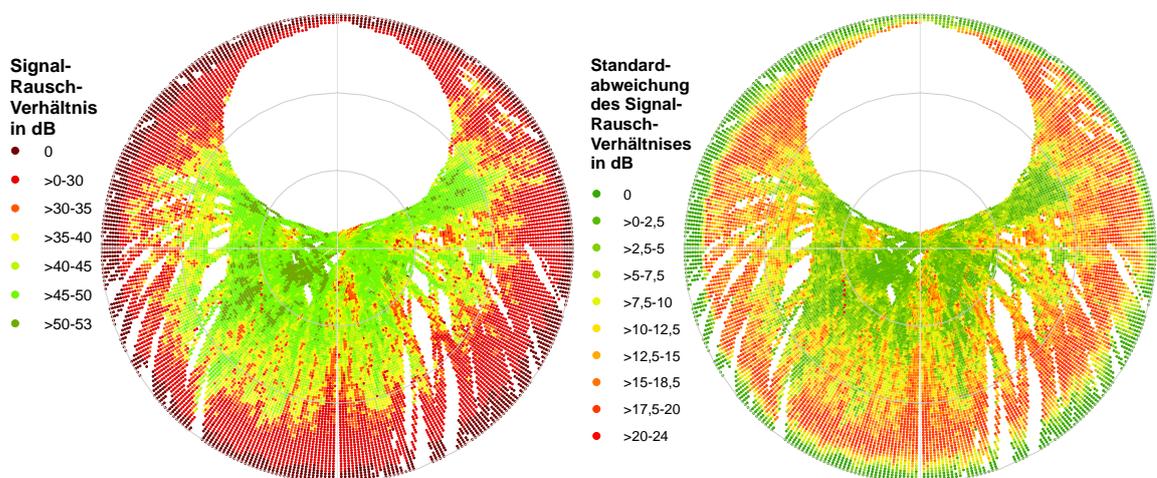


Abbildung 5.11: Satelliten-Rausch-Verhältnis des Empfängers 2 (Dach 1) in dB
(links: mittleres SNR, rechts: Standardabweichung des SNR)

Ab einem Elevationswinkel von ca. 30° sinken die SNR-Werte sehr stark. Im Vergleich mit Abbildung D.9 ($\text{SNR} \geq 30$ dB) wird jedoch ersichtlich, dass dieser Effekt den teilweisen kompletten Abschirmungen der Satelliten ($\text{SNR} = 0$ dB) geschuldet ist. Ab ca. 30° findet somit ein teilweiser Komplettausfall der Satelliten statt. Ab ca. 15° kann kaum noch ein Signal unter einer Krone empfangen werden. Dies kann generell für alle drei überschrmteten Empfänger angenommen werden.

Darüber hinaus besteht ein Zusammenhang zwischen geringen mittleren SNR-Werten und der Standardabweichung. Das bedeutet, wenn die Werte abgeschirmt werden, streuen sie umso mehr. Dies führt zu einer verringerten Verwendung des jeweiligen Satelliten zur Positionsbestimmung.

In den Abbildungen D.3 bis D.12 sind die Satelliten-Rausch-Verhältnisse und die Standardabweichungen aller Empfänger sowohl für alle Satelliten als auch für Satelliten mit einem SNR von >30 dB als verzerrter 2D-Skyplot dargestellt.

5.4 Einfluss von externen Faktoren

Die Positionsgenauigkeit der drei überschirmten GNSS-Empfänger schwankt im Laufe der Zeit sehr stark. Dies lässt auf einen hohen Einfluss von externen Faktoren schließen, welche im vorliegenden Kapitel näher untersucht werden sollen. Dabei soll auf den Einfluss der Zeit im Allgemeinen, der Satellitenverfügbarkeit, der Überschirmung, des Laubfalls, des Windes, des Niederschlages, der Luftfeuchte sowie der Temperatur eingegangen werden.

In den Tabellen 5.4 und 5.5 sind sowohl der Korrelationskoeffizient nach Pearson als auch deren Signifikanz (p) der Kombination von externen Faktoren und Genauigkeitsindikatoren für die Empfänger separat und für alle gemeinsam dargestellt.

Tabelle 5.4: Korrelationkoeffizienten und Signifikanz der externen Faktoren I
(von oben: GPS-Empfänger 1, 2, 3)

Korrelation / Signifikanz	Niederschlag	Temperatur	Luftfeuchte	Wind	Satelliten in Track	Satelliten in View	PDOP	HDOP	VDOP	Rechtswert	Hochwert	HError	VError	PosError
Niederschlag		0,003	0,145	0,050	0,004	-0,027	0,007	0,017	0,000	-0,006	0,003	0,020	0,002	0,010
Temperatur	0,708		-0,517	-0,039	-0,011	-0,425	-0,030	0,007	-0,038	0,050	-0,022	0,089	0,043	0,066
Luftfeuchte	0,000	0,000		-0,089	-0,040	0,091	0,063	0,043	0,062	-0,032	0,001	-0,076	-0,044	-0,062
Wind	0,000	0,000	0,000		-0,035	0,020	0,103	0,131	0,075	-0,001	0,007	-0,023	-0,019	-0,022
Satelliten in Track	0,618	0,132	0,000	0,000		-0,137	-0,484	-0,498	-0,410	-0,026	-0,032	0,287	0,302	0,327
Satelliten in View	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000		0,152	0,100	0,164	-0,054	0,021	-0,276	-0,203	-0,254
PDOP	0,374	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,720	0,887	0,001	-0,025	-0,422	0,015	-0,152
HDOP	0,023	0,354	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,484	-0,009	-0,031	-0,157	-0,130	-0,149
VDOP	0,976	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		-0,003	-0,007	-0,490	0,062	-0,146
Rechtswert	0,452	0,000	0,000	0,918	0,001	0,000	0,938	0,255	0,643		0,337	-0,016	-0,051	-0,043
Hochwert	0,722	0,004	0,942	0,337	0,000	0,006	0,001	0,000	0,358	0,000		0,050	0,033	0,045
HError	0,008	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,038	0,000		0,567	0,804
VError	0,820	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,048	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,941
PosError	0,186	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Korrelation / Signifikanz	Niederschlag	Temperatur	Luftfeuchte	Wind	Satelliten in Track	Satelliten in View	PDOP	HDOP	VDOP	Rechtswert	Hochwert	HError	VError	PosError
Niederschlag		0,001	0,155	0,065	-0,069	-0,018	0,117	0,118	-0,088	-0,026	0,040	0,104	0,088	0,116
Temperatur	0,915		-0,553	-0,031	-0,010	-0,327	0,139	0,100	0,010	-0,050	0,013	0,059	0,051	0,064
Luftfeuchte	0,000	0,000		-0,076	-0,085	0,069	0,008	0,016	-0,016	-0,002	0,105	0,029	0,057	0,056
Wind	0,000	0,000	0,000		-0,196	-0,026	0,537	0,542	-0,478	-0,039	0,025	0,350	0,345	0,430
Satelliten in Track	0,000	0,159	0,000	0,000		-0,007	-0,520	-0,584	0,361	-0,043	-0,092	-0,538	-0,411	-0,547
Satelliten in View	0,008	0,000	0,000	0,000	0,291		-0,065	-0,070	0,085	0,001	-0,092	-0,112	-0,106	-0,128
PDOP	0,000	0,000	0,241	0,000	0,000	0,000		0,868	-0,277	-0,014	0,079	0,680	0,510	0,696
HDOP	0,000	0,000	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000		-0,580	0,021	0,140	0,840	0,400	0,708
VDOP	0,000	0,122	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	-0,124	-0,500	-0,128	-0,366
Rechtswert	0,000	0,000	0,815	0,000	0,000	0,934	0,043	0,002	0,966		-0,105	0,038	0,055	0,053
Hochwert	0,000	0,049	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,124	0,115	0,146
HError	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,453	0,812
VError	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,879
PosError	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Korrelation / Signifikanz	Niederschlag	Temperatur	Luftfeuchte	Wind	Satelliten in Track	Satelliten in View	PDOP	HDOP	VDOP	Rechtswert	Hochwert	HError	VError	PosError
Niederschlag	1	0,006	0,230	0,107	-0,080	0,004	0,092	0,120	-0,123	0,013	0,017	0,082	0,062	0,082
Temperatur	0,672		-0,388	0,221	-0,241	-0,041	0,382	0,342	-0,090	-0,117	0,080	0,206	0,228	0,231
Luftfeuchte	0,000	0,000		-0,260	0,008	0,064	-0,085	-0,092	0,053	0,122	0,003	0,013	0,026	0,029
Wind	0,000	0,000	0,000		-0,109	-0,040	0,349	0,390	-0,352	-0,074	-0,026	0,184	0,168	0,192
Satelliten in Track	0,000	0,000	0,547	0,000		0,157	-0,529	-0,625	0,277	0,023	-0,184	-0,471	-0,253	-0,388
Satelliten in View	0,795	0,002	0,000	0,003	0,000		-0,104	-0,119	0,051	-0,023	-0,020	-0,126	-0,030	-0,066
PDOP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,851	-0,018	0,012	0,065	0,567	0,444	0,556
HDOP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		-0,397	0,042	0,065	0,669	0,339	0,549
VDOP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,186	0,000		0,087	-0,040	-0,215	0,098	-0,082
Rechtswert	0,330	0,000	0,000	0,000	0,084	0,083	0,379	0,002	0,000		0,199	0,140	0,134	0,123
Hochwert	0,213	0,000	0,849	0,052	0,000	0,146	0,000	0,000	0,003	0,000		0,061	0,097	0,066
HError	0,000	0,000	0,334	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,717	0,921
VError	0,000	0,000	0,054	0,000	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,898
PosError	0,000	0,000	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

signifikant 0,000
 nicht signifikant 0,777

Korrelation negativ positiv
 stark -0,6 0,6
 schwach -0,2 0,2

Tabelle 5.5: Korrelationskoeffizienten und Signifikanz der externen Faktoren II
(von oben: GPS-Empfänger 4, alle)

Signifikanz \ Korrelation	Niederschlag	Temperatur	Luftfeuchte	Wind	Satelliten in Track	Satelliten in View	PDOP	HDOP	VDOP	Rechtswert	Hochwert	HError	VError	PosError
Niederschlag		-0,022	0,252	0,059	-0,090	0,037	0,136	0,131	-0,077	-0,051	0,051	0,111	0,113	0,139
Temperatur	0,075		-0,477	0,201	-0,220	-0,049	0,387	0,322	-0,046	-0,267	0,111	0,228	0,221	0,271
Luftfeuchte	0,000	0,000		-0,237	0,012	0,124	-0,078	-0,074	0,042	0,052	-0,012	-0,017	0,020	0,004
Wind	0,000	0,000	0,000		-0,180	-0,029	0,545	0,539	-0,364	-0,069	0,027	0,350	0,326	0,417
Satelliten in Track	0,000	0,000	0,327	0,000		0,277	-0,543	-0,590	0,222	0,101	-0,127	-0,653	-0,356	-0,557
Satelliten in View	0,003	0,000	0,000	0,020	0,000		-0,030	-0,024	-0,003	-0,034	0,050	-0,038	0,129	0,081
PDOP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017		0,854	-0,099	-0,118	0,141	0,696	0,561	0,735
HDOP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,053	0,000		-0,461	-0,088	0,212	0,881	0,402	0,709
VDOP	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,784	0,000	0,000		0,126	-0,106	-0,460	0,031	-0,218
Rechtswert	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000		0,063	-0,090	-0,018	-0,065
Hochwert	0,000	0,000	0,354	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,207	0,097	0,163
HError	0,000	0,000	0,168	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,380	0,739
VError	0,000	0,000	0,110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,139	0,000	0,000		0,897
PosError	0,000	0,000	0,762	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Signifikanz \ Korrelation	Niederschlag	Temperatur	Luftfeuchte	Wind	Satelliten in Track	Satelliten in View	PDOP	HDOP	VDOP	Rechtswert	Hochwert	HError	VError	PosError
Niederschlag		0,000	0,161	0,061	-0,036	-0,018	0,057	0,075	-0,047	-0,001	0,001	0,071	0,052	0,069
Temperatur	0,996		-0,518	0,030	0,039	-0,393	0,025	0,055	-0,094	-0,166	0,168	0,084	0,056	0,072
Luftfeuchte	0,000	0,000		-0,127	-0,069	0,106	0,031	0,017	0,053	0,081	-0,081	0,001	0,027	0,022
Wind	0,000	0,000	0,000		-0,079	-0,030	0,240	0,323	-0,257	-0,070	0,070	0,214	0,182	0,227
Satelliten in Track	0,000	0,000	0,000	0,000		-0,116	-0,791	-0,752	-0,314	-0,239	0,251	-0,502	-0,479	-0,549
Satelliten in View	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,077	0,023	0,180	0,353	-0,356	-0,133	-0,088	-0,110
PDOP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,899	0,417	0,203	-0,216	0,586	0,614	0,679
HDOP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,071	0,141	-0,151	0,751	0,536	0,703
VDOP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,221	-0,230	-0,136	0,240	0,087
Rechtswert	0,777	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		-1,000	-0,064	-0,026	-0,031
Hochwert	0,802	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,058	0,017	0,023
HError	0,000	0,000	0,884	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,633	0,861
VError	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,926
PosError	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Aufgrund der hohen Stichprobenanzahl, der Vielzahl von beeinflussenden, externen Faktoren und den damit verbundenen systematischen Fehlern sollten diese Signifikanztests jedoch kritisch beurteilt werden und nicht ohne logische Hinterfragung Aussagen getroffen werden.

5.4.1 Einfluss der Zeit

Bei der Zeit handelt es sich streng genommen nicht um einen Einflussfaktor bzw. lediglich um einen indirekten. Andere Einflussfaktoren schwanken über der Zeit und korrelieren (teilweise periodisch) somit sehr stark mit dieser. Die Zeit stellt trotz alledem ein Werkzeug zur Überprüfung von Veränderungen dar. So zeigt Abbildung C.2 die Standardabweichung des EPE ≈ 113 über der Zeit.

Es ist deutlich zu erkennen, dass es Unterschiede zwischen den Empfängern, aber auch zeitliche Schwankungen innerhalb der einzelnen Empfänger gibt. Besonders zwischen Winter Anfang 2010 und Frühjahr 2010 sind deutliche Unterschiede bei den überschirmten Empfängern zu beobachten (siehe auch Abbildung 5.3).

Diese zeitlichen Schwankungen basieren auf unterschiedlichen sich überlagernden Aspekten. Es ist nicht trivial, diese zu separieren. Korrelationen und Autokorrelationen der verschiedenen Parameter spielen in die Datenauswertung hinein. In Abbildung 5.12 ist dies deutlich z. B. anhand der periodischen Schwankungen der Temperatur zu erkennen. Weiterhin ist die mittlere zweidimensionale Windgeschwindigkeit (geklustert auf 30 Minuten) dargestellt.

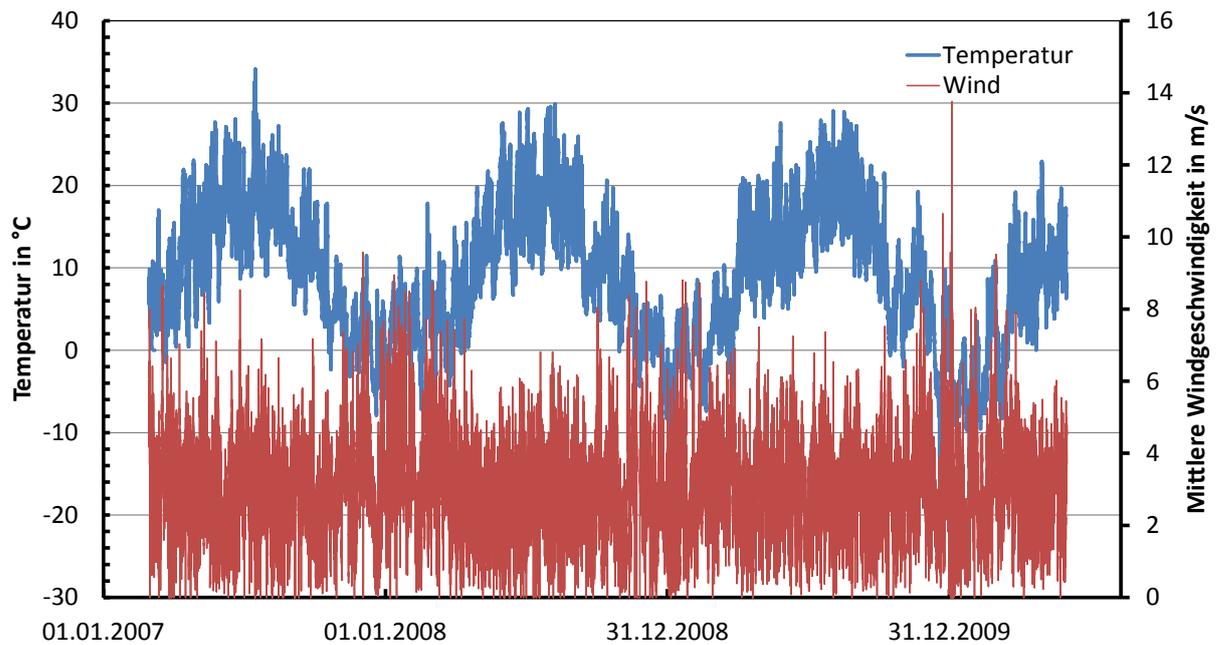


Abbildung 5.12: Wind und Temperatur im Verlauf der Zeit (Auflösung 30 min)

Abbildung 5.13 zeigt den 30-minütigen Niederschlag sowie die relative Luftfeuchtigkeit im Untersuchungszeitraum. Starke Schwankungen sind dabei zu verzeichnen. Um diese Effekte zu berücksichtigen soll folgend näher auf diese Parameter eingegangen werden.

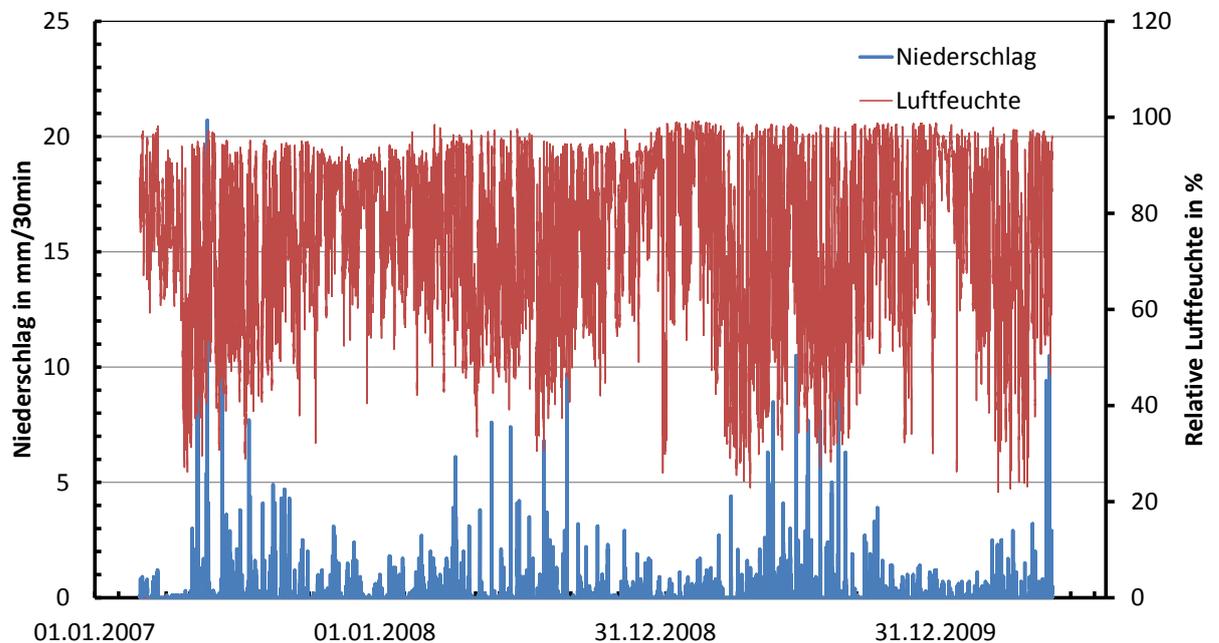


Abbildung 5.13: Niederschlag und relative Luftfeuchtigkeit im Verlauf der Zeit (Auflösung 30 min)

5.4.2 Einfluss der Satellitenverfügbarkeit

Für eine Positionsbestimmung im GPS-Empfänger ist die Zahl der verfügbaren und tatsächlich verwendeten Satelliten entscheidend. Je größer die Anzahl, um so genauer kann die Position bestimmt werden. Abbildung 5.14 stellt die Verteilung der „Satellites in track“ für die jeweiligen Empfänger dar.

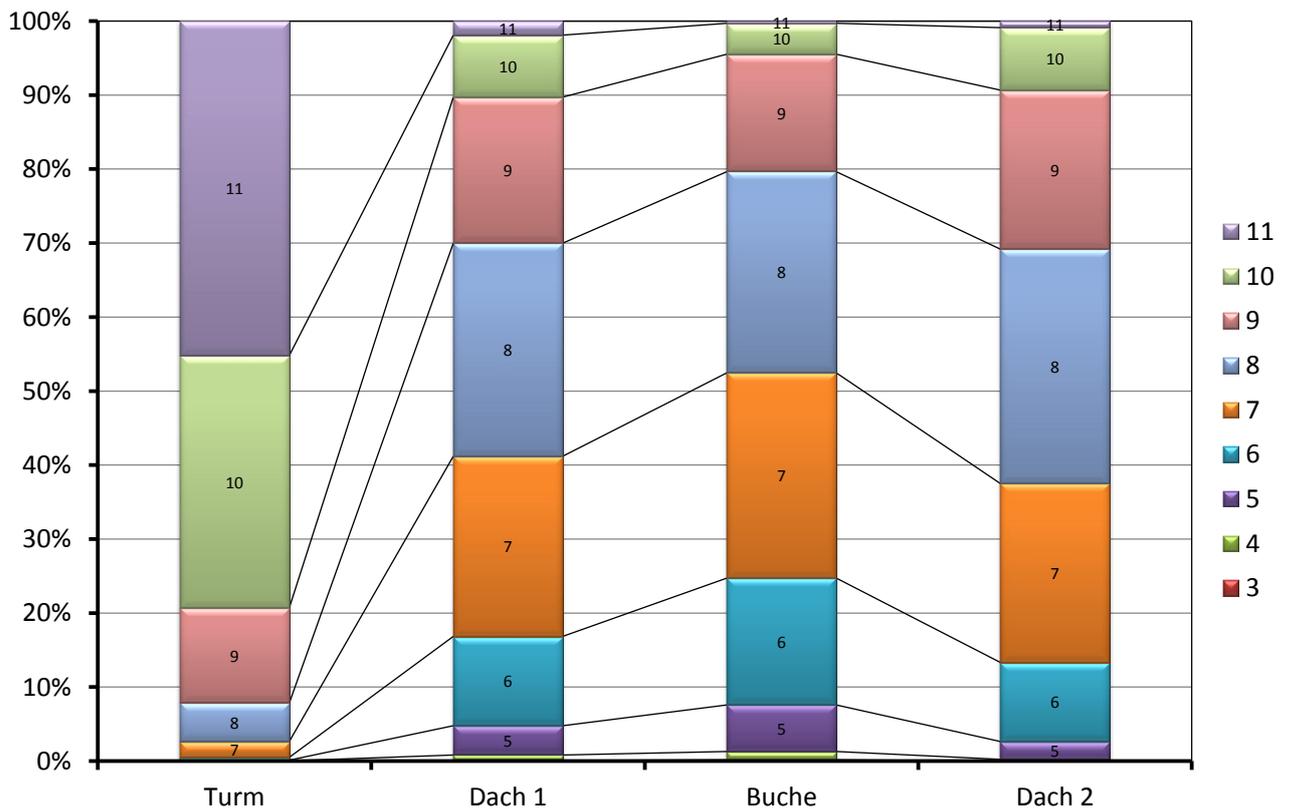


Abbildung 5.14: Verfügbarkeit der verwendeten Satelliten im Messzeitraum („Satellites in track“)

Die Unterschiede zeigen deutlich, dass die Referenz ca. 50 % der Zeit 11 Satelliten zur Positionsbestimmung benutzt. In 80 % der Fälle sind es mindestens 10. Bei den übershirmten Empfängern stellt sich ein anderes Bild dar. So ähneln sich die Empfänger 2 (Dach 1) und 4 (Dach 2) sehr stark. In 30 % der Fälle sind mindestens 9 Satelliten und in 85 % mindestens 7 Satelliten stark genug, um verwendet zu werden.

Dem Empfänger 3 im Buchenbestand stehen hingegen im Mittel weniger Satelliten als dem Empfänger 2 (Dach 1) und dem Empfänger 4 (Dach 2) zur Positionsbestimmung zur Verfügung. So sind mindestens 9 Satelliten in nur 20 % und mindestens 7 Satelliten in 75 % der Fälle vorhanden. Es ist zu erwarten, dass der Empfänger 3 auch eine schlechtere Positionsgenauigkeit und einen schlechteren PDOP aufweist.

Neben der Anzahl der Satelliten spielt die Verteilung eine wichtige Rolle. Diese ist stark vom Elevationswinkel und Azimuthwinkel abhängig. Abbildung D.1 stellt diesen Zusammenhang dar. Die Überschirmung beeinflusst somit die verwendbaren Satelliten, welche sich stärker auf den Zenit konzentrieren. Somit ergeben sich für die unterschiedlichen Empfänger unterschiedliche PDOP-Verteilungen, welche als summarische Häufigkeit in Abbildung 5.15 gezeigt werden. Dabei laufen die drei überschirmten Empfänger weitestgehend parallel, wobei im Buchenbestand konstant leicht geringere PDOP-Werte erreicht werden.

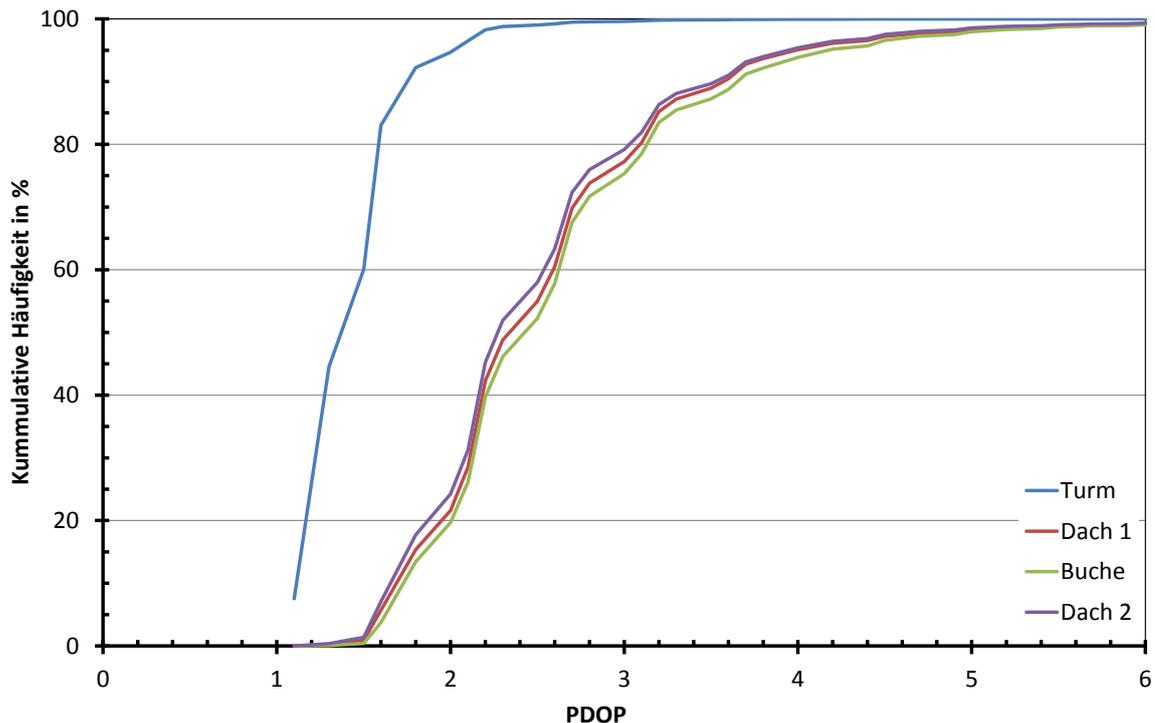


Abbildung 5.15: Histogramm PDOP der verschiedenen GNSS-Empfänger

Die Zeit spielt bei der Satellitenverfügbarkeit eine wesentliche Rolle. So schwankt die Zahl aufgrund von Ausfällen, Korrekturen und Hinzufügen weiterer GPS-Satelliten. Allerdings konnten im Laufe der Untersuchungen nur geringe Schwankungen der Verfügbarkeit der Satelliten festgestellt werden.

5.4.3 Einfluss der Überschirmung

Allgemeine Überschirmung

Die Überschirmung stellt eines der Hauptprobleme der Positionsfindung dar. Sie schränkt die Satellitenverfügbarkeit sehr stark ein, wie die Messung des Signal-Rausch-Verhältnisses eindrucksvoll zeigt (siehe Kapitel 5.3). Die Überschirmung kann daher auch als Parameter der Beeinflussung verwendet werden.

Bei dem Vergleich vom Signal-Rausch-Verhältnis und Fisheye-Bild handelt es sich im Prinzip um den Vergleich von der Durchlässigkeit der Krone für Mikrowellenstrahlung und für optische Strahlung. Da optisch sichtbares Licht eine viel geringere Wellenlänge besitzt, kommt es durch viel kleinere Lücken in den Kronen hindurch. Dagegen sind die Beugungseigenschaften von Mikrowellenstrahlung wesentlich ausgeprägter. Der Vergleich ist in den Abbildungen 5.16 und 5.17 dargestellt.

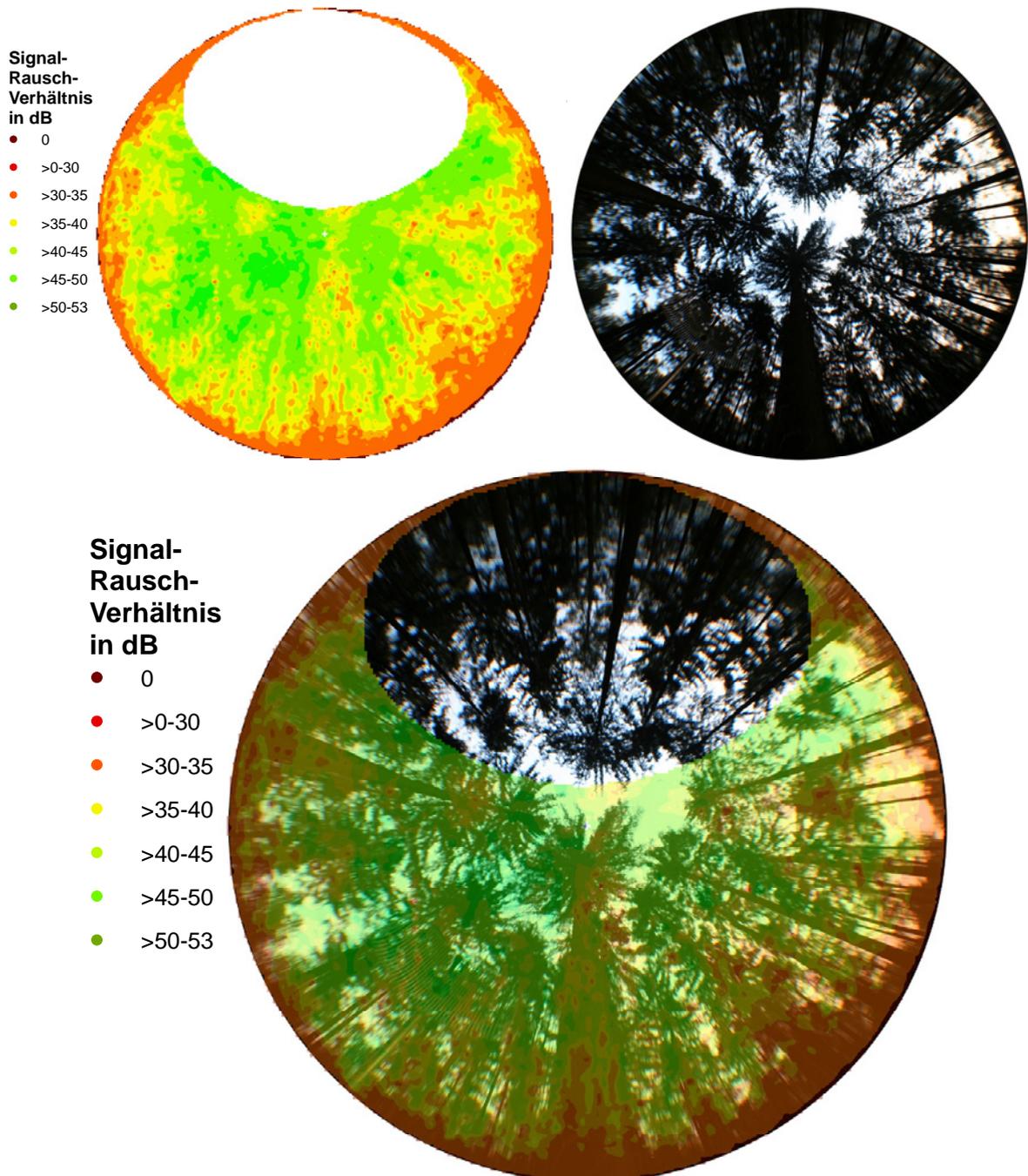


Abbildung 5.16: Projektion der Satellitenstärke auf ein Fisheye-Bild (Dach 1)

Es wurde jeweils das interpolierte Satelliten-Rausch-Verhältnis des Empfängers 2 (Dach 1) und des Empfängers 3 (Buche) auf das jeweilige Fisheye-Bild des Standortes projiziert. Die Überlagerung zeigt deutlich, dass die Satellitensignale besonders von dicken Stämmen und starken Anballungen dichter Kronen behindert werden. Dies gilt für Fichtenkronen und für Buchenkronen gleichwertig. Es scheint, dass auch im lichten Kronenbereich eine hohe Anzahl an Signalen den Empfänger mit einer hohen Intensität erreichen.

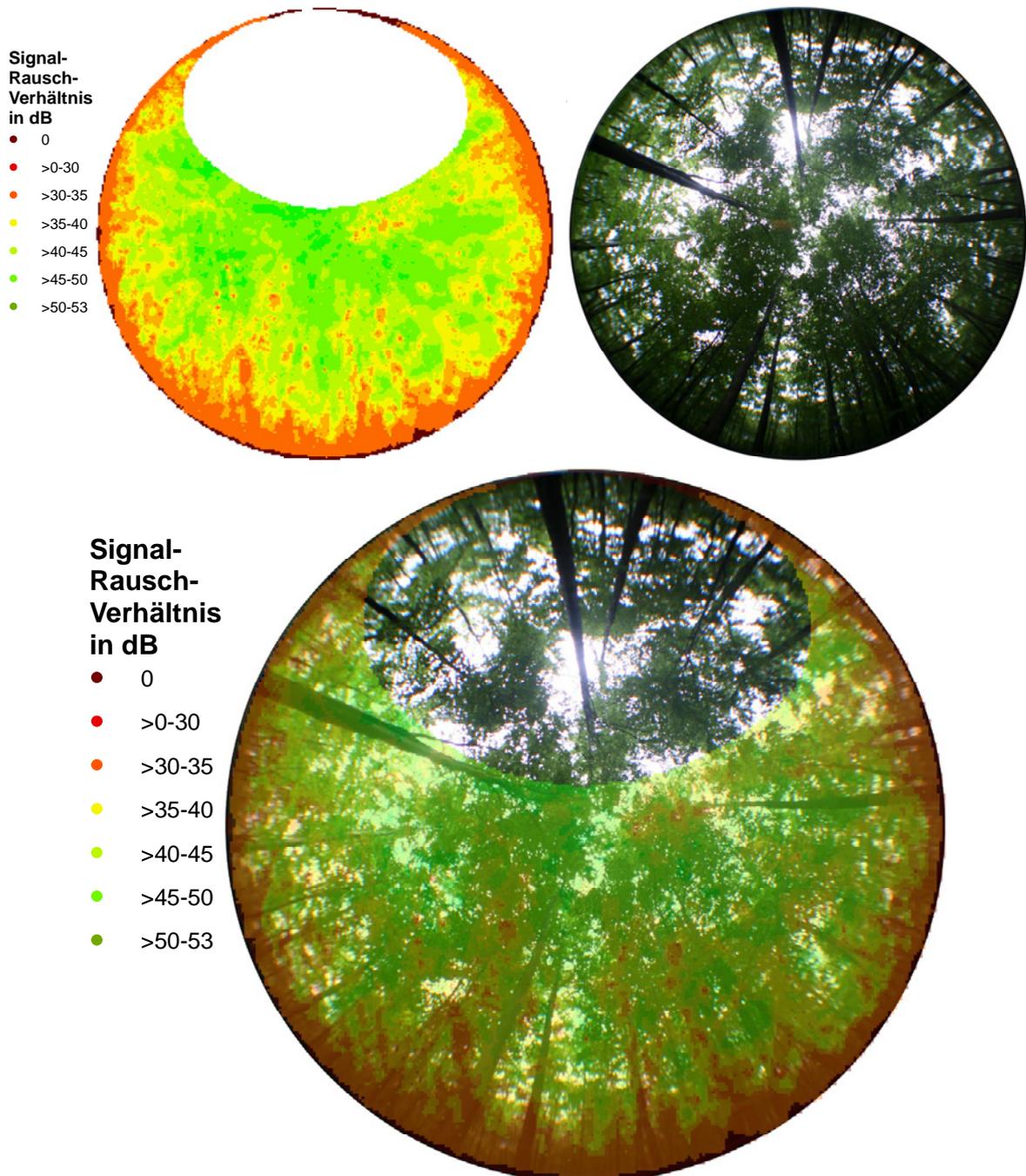


Abbildung 5.17: Projektion der Satellitenstärke auf ein Fisheye-Bild (Buche)

Laubfall

Im Buchenwald tritt der besondere Fall des Blattverlustes in den Wintermonaten auf. Dabei verlichten sich die Kronen extrem und beeinflussen somit auch die Durchlässigkeit der Satellitensignale und die Positionsgenauigkeit der Messungen. Abbildung 5.18 stellt zur Veranschaulichung die optischen Unterschiede mit und ohne Belaubung dar.

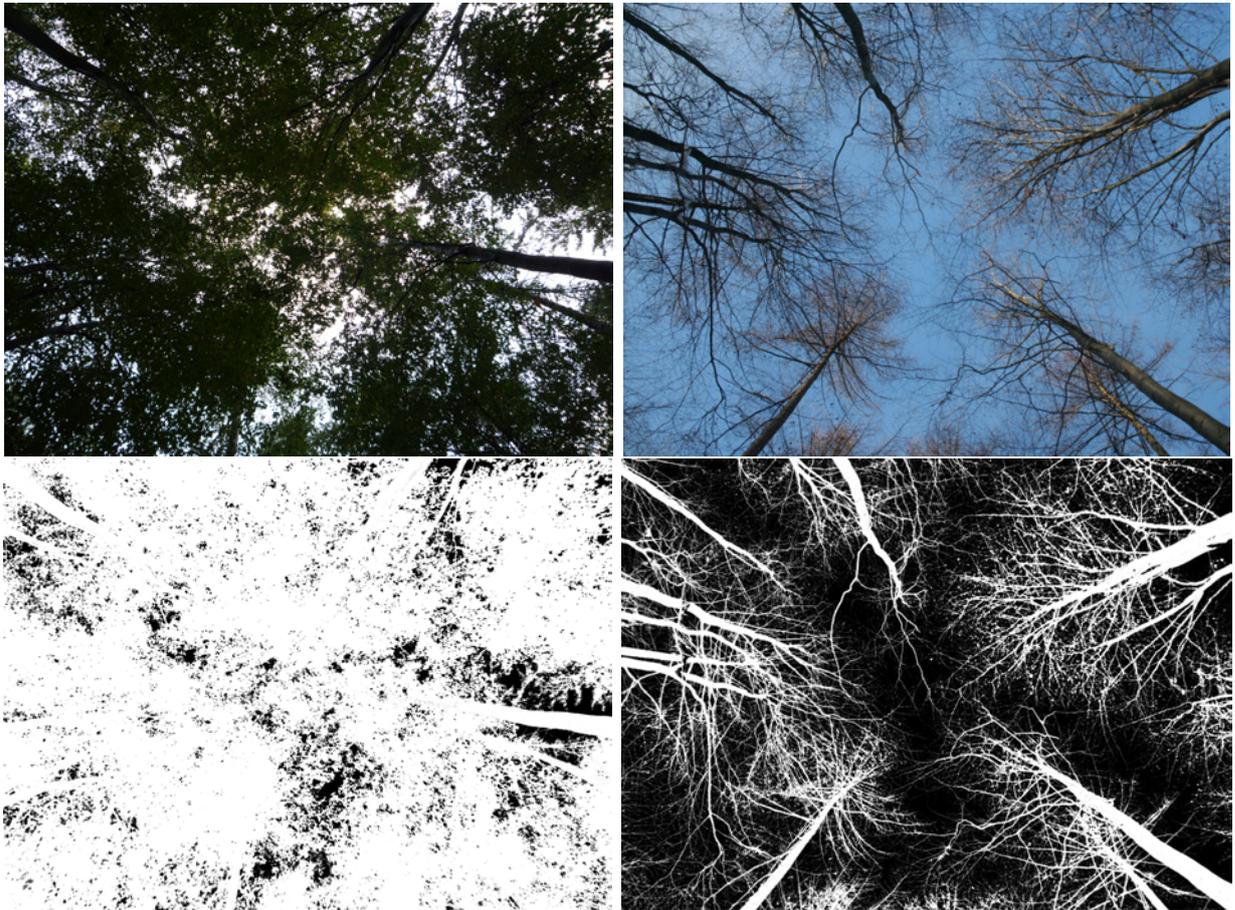


Abbildung 5.18: Vergleich des Zustandes der Buchenkrone über GPS-Empfänger am 16.10.2009 (links) und am 21.12.2009 (rechts) (oben: Originalaufnahme, unten: klassifiziert)

Alle aufgenommenen Bilder wurden nach der Methode von [SCHWALBE ET AL. \(2006\)](#) klassifiziert, wobei Vegetation und Himmel voneinander getrennt werden. Die Bedeckung und damit Abschirmung erscheint nach der Klassifizierung weiß und der Anteil des Himmels schwarz. Verschiedene Lichtverhältnisse wie Sonne und Wolken, werden bei dem Verfahren ausgeglichen. Anhand der dunklen Farbwerte kann somit der Anteil des Himmels und damit der für sichtbares Licht durchlässige Teil bestimmt werden. Dieser schwankte auf der Versuchsfläche des Buchenbestandes von 9 % (Mitte Oktober 2009) über 72 % (Dezember 2009) bis zu 5,4 % (Mai 2010). Abbildung 5.18 verdeutlicht dies mit 11 % Himmelsanteil am 16.10.2009 im Vergleich zum 21.12.2009 mit 72 % Himmelsanteil.

Basierend auf dem Himmelsprozent wurde das Überschirmungsprozent berechnet und über der Zeit interpoliert, um einen Anhaltspunkt für die Durchlässigkeit der Buchenkrone zu erhalten. Abbildung 5.19 stellt diesen Verlauf dar. Der Unterschied zwischen Belaubung und

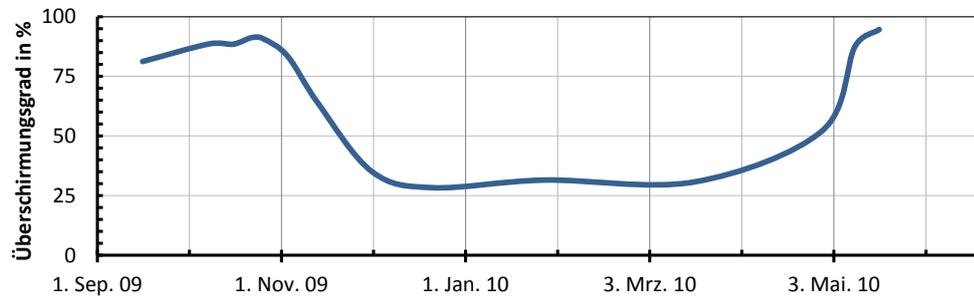


Abbildung 5.19: Überschirmungsgrad der Buchenkrone im Verlauf der Zeit

Entlaubung ist deutlich erkennbar und beträgt mehr als das Dreifache. Der November und der März bzw. April stellen dabei die Übergangszeiten dar.

Abbildung 5.20 zeigt die kumulative Häufigkeit des Signal-Rausch-Verhältnisses für den Empfänger 3 (Buche) in den einzelnen Monaten. Es ist zu erkennen, dass sich drei Klassen

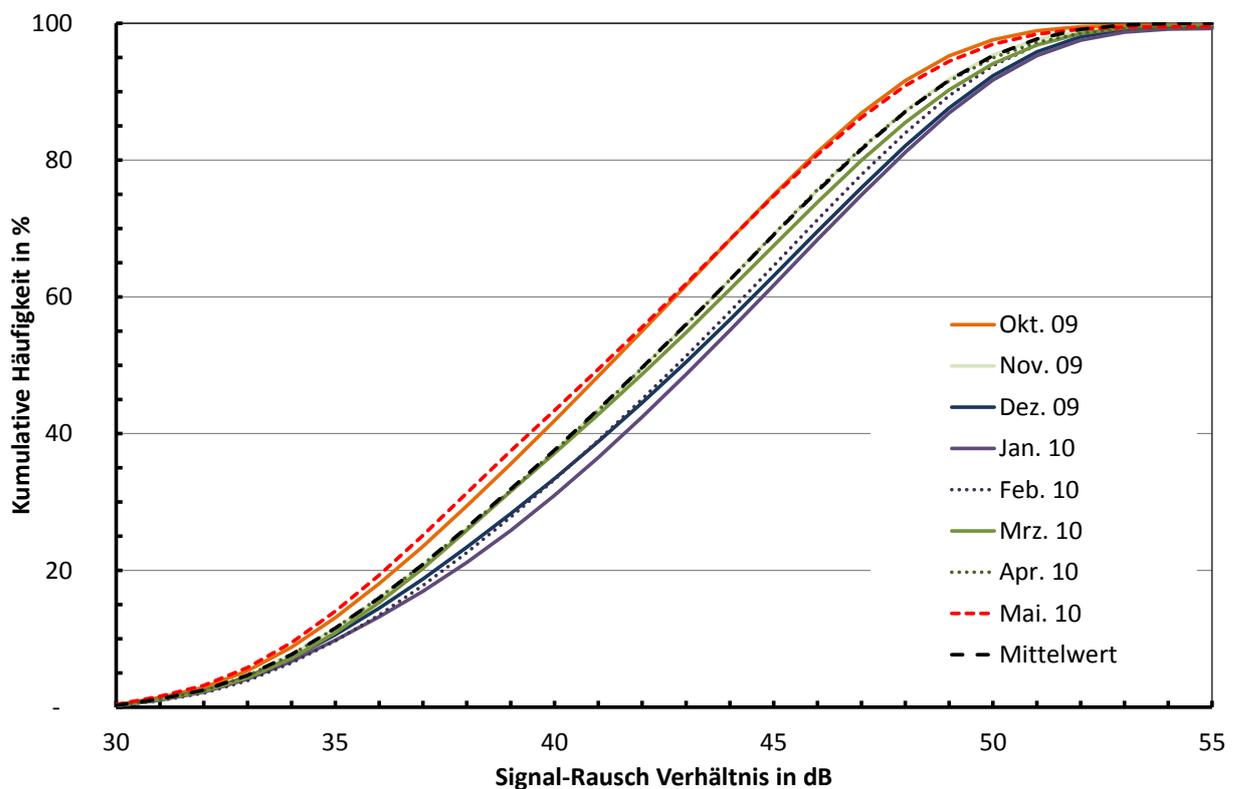


Abbildung 5.20: Histogramm SNR-Werte im Verlauf der Zeit des Empfängers 3 (Buche)

herausbilden, welche farblich gekennzeichnet wurden. In den Monaten mit starker Belaubung (Oktober und Mai - rote Farbe) sind die SNR-Werte deutlich geringer als in den Monaten mit

geringer Belaubung (Dezember, Januar und Februar - blaue Farbe). Die Übergansmonate (November, März und April - grüne Farbe) nehmen dabei Zwischenwerte ein, die in etwa dem Gesamtmittel entsprechen. Somit kann deutlich von einer günstigeren Empfangssituation im unbelaubten Zustand ausgegangen werden. Die drei Klassen sind signifikant unterschiedlich ($p=0,000$), wobei bei der hohen Stichprobenanzahl kritisch mit der Interpretation statistischer Tests umgegangen werden sollte.

Nicht nur die Verteilung des Satelliten-Rausch-Verhältnisses sondern auch die weiteren Genauigkeitsindikatoren ändern sich im Zuge des Blattfalls. Vier von ihnen sind in Abbildung 5.21 als tägliche Werte dargestellt.

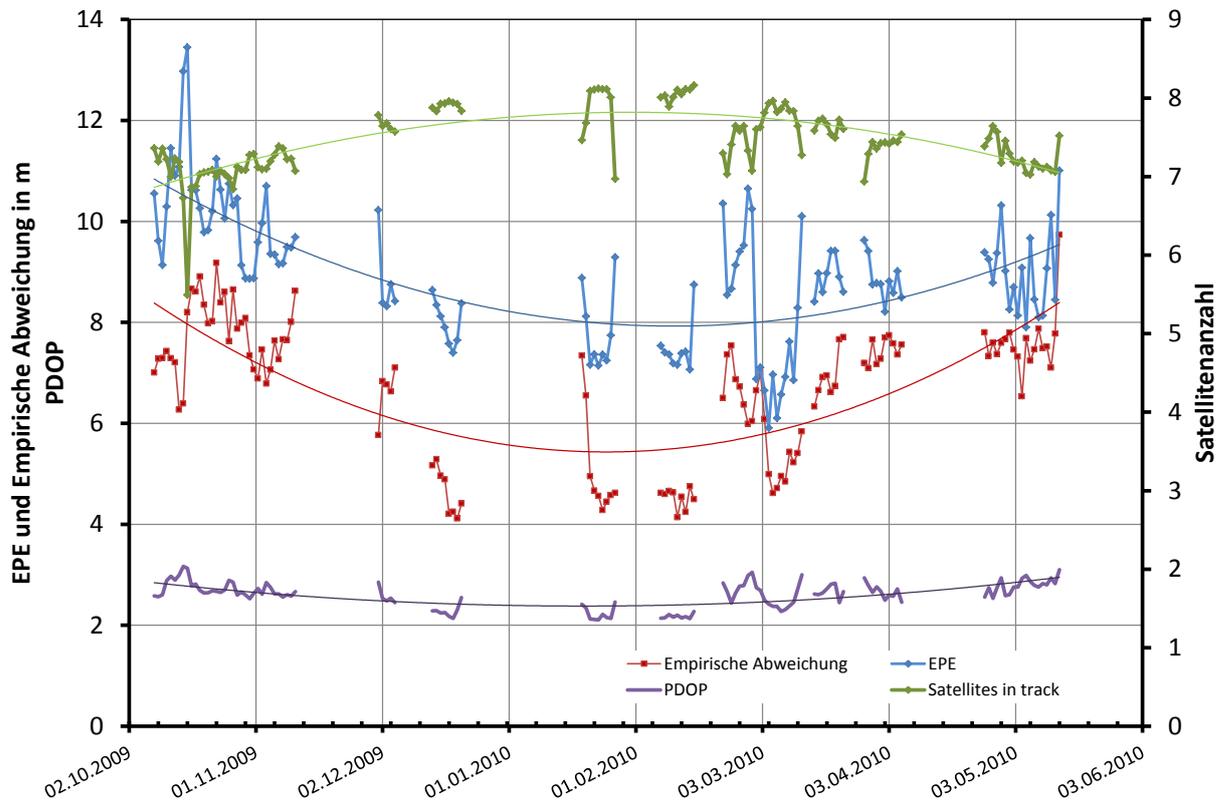


Abbildung 5.21: Täglicher EPE, empirische Abweichung, mittlerer PDOP und Satellitenanzahl des Empfängers 3 (Buche) im Verlauf der Zeit

Das auf den ersten Blick etwas verwirrende Bild klärt sich bei näherer Betrachtung auf. Durch verschiedene Fehlerquellen, die versuchsbedingt auftraten, liegen die Daten für den Buchenbestand nicht kontinuierlich vor (siehe Kapitel 5.1). Größere Lücken sind die Folge. Darüber hinaus kam es des Öfteren im Winter zu Schneeüberlagerung und zu Vereisungen des Empfängers, was teilweise für Einzeltage aber auch für mehrere Tage am Stück die Positionsbestimmung in den Wintermonaten verschlechtert hat. Dieser Einfluss ist nachträglich schwer zu quantifizieren bzw. eine genaue Ausreißerbeseitigung kann nicht erfolgen. Daher wurden zur Trendanalyse aus den Werten der vier Indikatoren jeweils eine Regression mit dem Modell eines Polynoms 2. Grades gebildet. Die Tendenz aller Indikatoren zeigt deut-

lich, dass der Laubverlust in den Wintermonaten einen hohen, positiven Einfluss auf die Positionsgenauigkeit hat.

So wird im Buchenbestand, von den Ausreißern abgesehen, im Winter im Mittel ein Satellit mehr zur Positionsbestimmung verwendet. Die vorher festgestellte erhöhte Satellitenstärke und geht, wenn auch geringfügig, einher mit in den Wintermonaten absinkenden PDOP-Werten. Dies bestätigt auch der in Abbildung 5.22 dargestellte Vergleich des SNR-Verhältnisses zwischen dem Monat Oktober und dem Monat Dezember. Es werden die allgemein und besonders bei geringeren Elevationswinkeln schlechteren Signalstärken deutlich. Dadurch ist der höhere PDOP-Wert in der Vegetationsperiode sachlich erklärbar. Weitere Monate sind sowohl für alle Satelliten als auch für die Satelliten ≥ 30 dB in den Abbildungen D.19 und D.20 aufgezeigt.

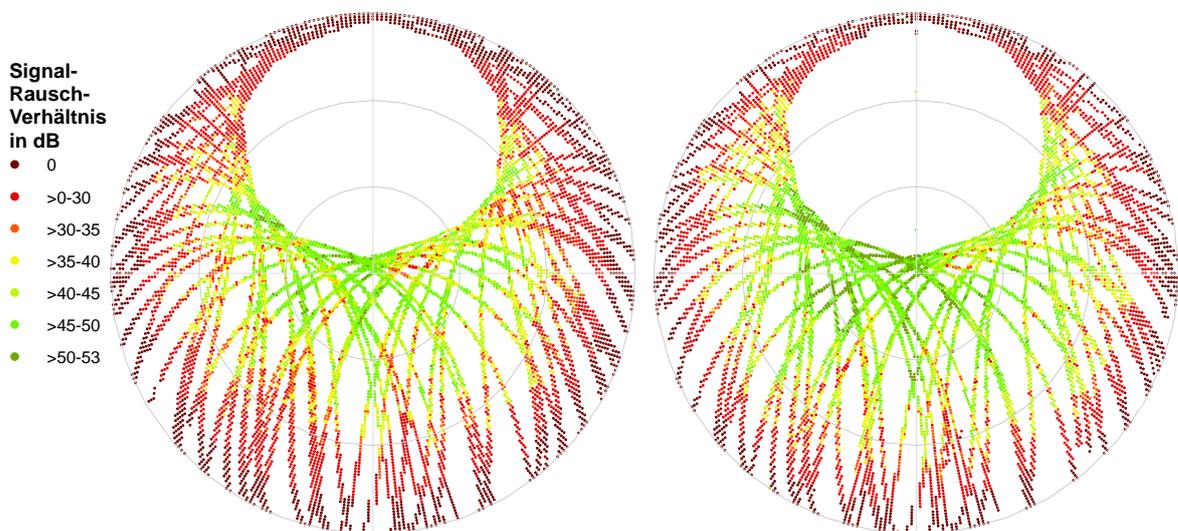


Abbildung 5.22: Satellitenstärke nach Monaten des Empfängers 2 (Buche, alle Satelliten)
(links: Oktober 2009, rechts: Dezember 2009)

Sowohl der geschätzte Positionsfehler als auch die empirisch ermittelte Abweichung von den tatsächlichen Koordinaten sinken signifikant im Zeitraum des Blattverlustes in der Größenordnung von 2-3 m. Aufgrund der hohen Anzahl von Fehlerquellen soll an dieser Stelle jedoch auf eine detaillierte quantitative Untersuchung der Genauigkeitserhöhung durch den Verlust der Blätter verzichtet werden.

Die Belaubung stellt somit einen entscheidenden Punkt der qualitätsbeeinflussenden Werte dar. Allerdings erreicht das Genauigkeitsniveau in den Wintermonaten nicht das der Referenz, so dass trotz geringer Überschildung von ca. 30 % die Stämme und Äste als weiteren starken Störungsfaktor ausweisen.

Die genannten Effekte treten erstaunlicherweise nicht nur im Buchenbestand auf, sondern sind sogar, wenn auch im geringeren Umfang, im Nadelholzbestand beobachtbar (siehe Abbildung B.1).

5.4.4 Einfluss des Windes

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Positionsgenauigkeit stellt der Wind dar. Es stehen zwei Auflösungen zur Verfügung. Eine 1-Minuten-Auflösung über einen Zeitraum von fünf Monaten und eine 30-Minuten-Auflösung für den gesamten Versuchszeitraum. Die Unterschiede in den Verteilungen sind in Abbildung 5.23 dargestellt.

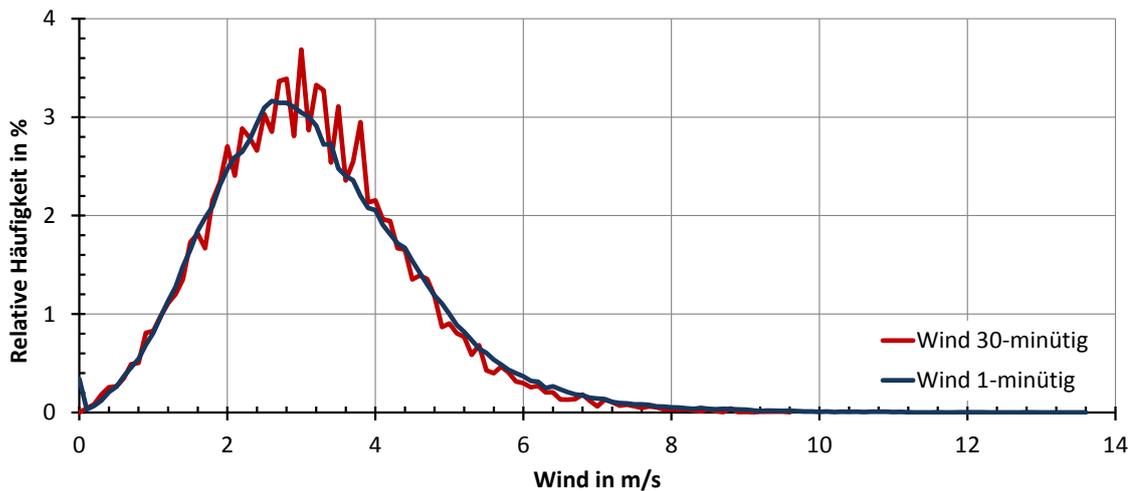


Abbildung 5.23: Verteilung der Windgeschwindigkeiten

Für die weitere Auswertung sollen vorrangig Winddaten mit der 1-Minuten-Auflösung verwendet werden, da diese den engen Zusammenhang zwischen kurzzeitigem Auftreten von Wind (Böen) und der Auswirkung auf den GPS-Empfänger beschreiben können. Darüber hinaus verdeutlicht Abbildung 5.23, dass bei einer Auflösung von 30 Minuten z. B. die Werte mit einer Windgeschwindigkeit von $0 \frac{m}{s}$ praktisch nicht auftreten, da diese durch die Mittelwertbildung eliminiert werden. Folgend soll der Wind nur bis zu einer Geschwindigkeit von $6 \frac{m}{s}$ betrachtet werden. Die Häufigkeit höherer Windgeschwindigkeiten ist sehr gering und die Datengrundlage für Verallgemeinerungen nicht gegeben.

Basierend auf den hoch aufgelösten Daten wurden für jeden Empfänger die verschiedenen Genauigkeitsindikatoren in Bezug zum Wind mit einer Auflösung von $\frac{1}{10} \frac{m}{s}$ geklustert. Abbildung 5.24 stellt den EPE [113](#), die gemessene Positionsabweichung und das Histogramm des Windes dar.

Alle Empfänger, außer Nr. 1 (Turm), dessen Positionsfehler konstant ist, weisen eine Abhängigkeit vom Wind auf. Auf den ersten Blick erstaunlich ist die Gegenläufigkeit von EPE und der tatsächlich gemessenen Positionsabweichung. Diese unplausible Tatsache bleibt auch nach mehrmaligem Nachrechnen, Neueinlesen der NMEA-Daten, Kombination verschiedener Wetterdaten sowie bei der Betrachtung von Einzeldaten stets erhalten. Es scheint sich somit nicht um einen Rechenfehler oder um einen systematischen Fehler zu handeln. Dafür spricht auch die Tatsache, dass der Empfänger 1 (Turm) sehr konstante Werte, sowie die

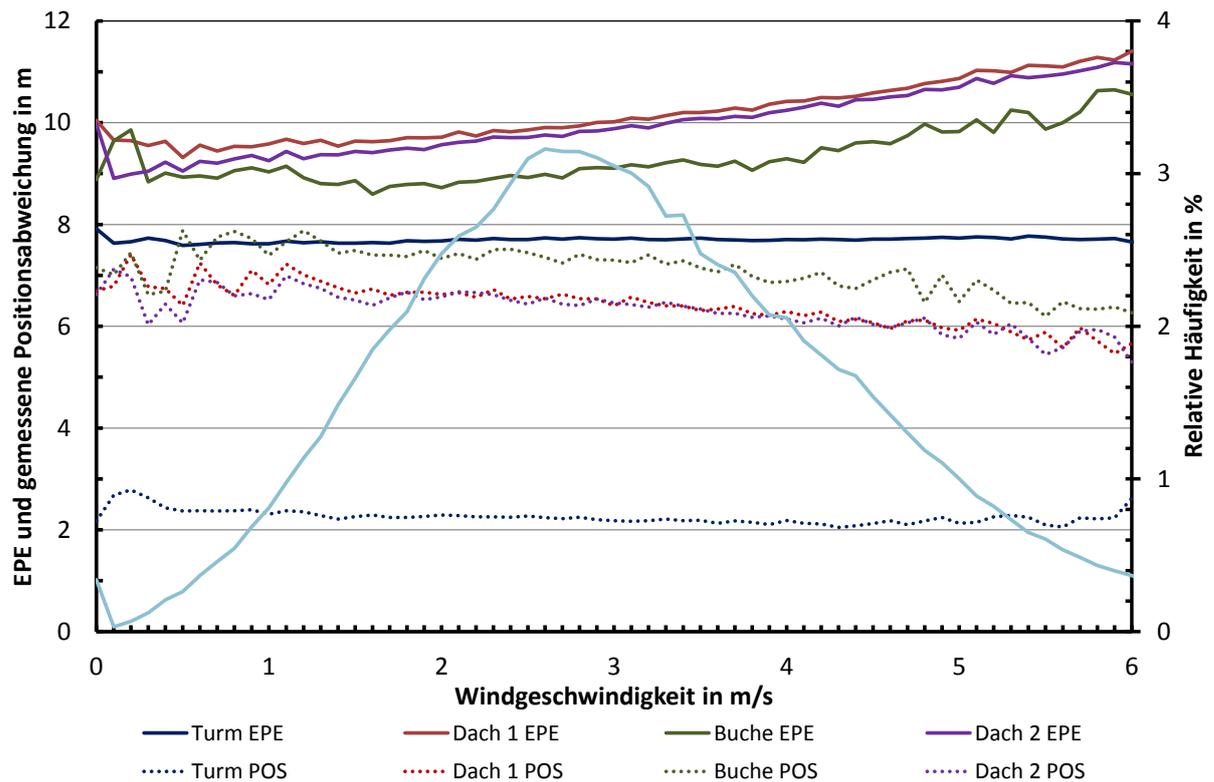


Abbildung 5.24: Einfluss des Windes auf den EPE und der Positionsgenauigkeit

hohe Stichprobenanzahl von $N > 1.500.000$ Messwerten, welche in die Auswertung einfließen, aufweist.

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt dabei der geschätzte Positionsfehler [113](#) zu. Dies bedeutet, je windiger es ist, umso schlechter ist die Position. Das bestätigt auch der PDOP, welcher mit zunehmender Windgeschwindigkeit signifikant größer wird (siehe Abbildung [B.6](#)). Darüber hinaus sinkt die Anzahl der zur Positionsbildung verwendeten Satelliten geringfügig (siehe Abbildung [B.7](#)), was theoretisch mit einer Verschlechterung der Positionsgenauigkeit einhergeht. Die tatsächliche gemessene Positionsabweichung hingegen nimmt mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab. Dieses Ergebnis tritt sowohl bei der Verwendung der hoch aufgelösten Winddaten (1 min) als auch bei den halbstündlichen Winddaten auf.

Eine sachlogische Erklärung dieses Phänomens ist nicht trivial. Der EPE wird aufgrund von verschiedenen Indikatoren wie PDOP, Satellitenanzahl berechnet. Er beschreibt die zu erwartende Streuung um den Mittelpunkt und ist ein Maß für die Präzision [7](#). Die tatsächliche Positionsabweichung hingegen ist ein Maß für die Richtigkeit [7](#) der Messung. Somit ist festzustellen, dass bei höheren Windgeschwindigkeiten die Präzision der Messung sinkt aber die Richtigkeit steigt.

Eine Erklärung für dieses Phänomen könnte es sein, dass die Kronen durch den Wind bewegt werden und die Signale dadurch verstärkt durch die Kronen zum Empfänger gelangen. Es werden Signale von Satelliten registriert, die ohne Wind nicht „sichtbar“ sind. Allerdings

kommt es jedoch aufgrund der erhöhten Beugungseigenschaften und relativen langen Amplituden der Frequenzen des Satellitensignales häufig zu Unterbrechungen und zur Reflektion des Signals. Diese beiden Effekte sind gegenläufig und können eine Erklärung für das beobachtete Phänomen abgeben. Ein weiterer Grund kann sein, dass die Berechnung des EPE bei Wind falsch ist. Es sei allerdings noch einmal betont, dass dies nur eine Vermutung des Autors ist und nicht näher nachgewiesen werden kann. Was tatsächlich im Bereich der Baumkrone passiert und zu dem erwähnten Effekt der gegenläufigen Indikatoren führt, kann nicht abschließend beurteilt werden und bedarf weiterer gezielter Forschung.

Der Effekt des Windes tritt besonders bei höheren Geschwindigkeiten ab ca. $3 \frac{m}{s}$ in Erscheinung und kann die Genauigkeit der Messung im Wald um ca. 1 m erhöhen. Eine weitere qualitative Analyse des Zusammenhangs ist bei kumulierten Daten, besonders bei hohen Stichprobenzahlen, schwer feststellbar. Dies soll der Vergleich der Werte in den Tabellen 5.6 und 5.7 verdeutlichen. Sie stellen die Korrelationskoeffizienten zwischen der Windgeschwindigkeit und den Genauigkeitsindikatoren für die verschiedenen Empfänger dar. Dabei gibt Tabelle 5.6 das Ergebnis für die nach der Zeit geklusterten minütlichen Werte und Tabelle 5.7 die gewichteten, nach $\frac{1}{10} \frac{m}{s}$ geklusterten Werte an.

Tabelle 5.6: Einfluss des Windes auf den EPE und der Positionsgenauigkeit I
Klusterung Wind minütlich, $N > 1.500.00$

Empfänger	Korrelation nach Pearson				Signifikanz				Anzahl N
	Positions- abweichung	Satellites in track	EPE	PDOP	Positions- abweichung	Satellites in track	EPE	PDOP	
Turm	-0,015	0,001	0,010	0,054	0,000	0,729	0,000	0,000	166.955
Dach 1	-0,068	-0,101	0,237	0,262	0,000	0,000	0,000	0,000	179.927
Buche	-0,056	-0,042	0,118	0,153	0,000	0,000	0,000	0,000	116.645
Dach 2	-0,069	-0,106	0,260	0,315	0,000	0,000	0,000	0,000	136.782
Alle Empfänger	-0,058	-0,031	0,151	0,144	0,000	0,000	0,000	0,000	600.309
überschirmte Empfänger	-0,070	-0,070	0,202	0,237	0,000	0,000	0,000	0,000	433.354

Tabelle 5.7: Einfluss des Windes auf den EPE und der Positionsgenauigkeit II
Klusterung Wind 0,1 m/s, $N = 123$

Empfänger	Korrelation nach Pearson				Signifikanz				Anzahl N
	Positions- abweichung	Satellites in track	EPE	PDOP	Positions- abweichung	Satellites in track	EPE	PDOP	
Turm	-0,261	0,022	0,256	0,834	0,000	0,000	0,000	0,000	166.955
Dach 1	-0,937	-0,776	0,967	0,967	0,000	0,000	0,000	0,000	179.927
Buche	-0,855	-0,648	0,874	0,947	0,000	0,000	0,000	0,000	116.645
Dach 2	-0,912	-0,865	0,979	0,971	0,000	0,000	0,000	0,000	136.782
Alle Empfänger	-0,138	-0,042	0,336	0,207	0,000	0,000	0,000	0,000	600.309
überschirmte Empfänger	-0,670	-0,313	0,787	0,869	0,000	0,000	0,000	0,000	433.354

Beide Wege sind zielführend. Die zweite Klusterung eliminiert jedoch eine Vielzahl von Variationen, welche sich stark auf die Parameter auswirkt. Die Grundaussage bleibt jedoch erhalten.

Die Tabellen 5.6 und 5.7 stellen die unterschiedliche Korrelationsrichtungen der Indikatoren noch einmal deutlich statistisch dar. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass der Turm zwar signifikante, aber sehr geringe Korrelationen der Positionsgenauigkeit mit dem Wind aufweist. Die überschilderten Empfänger hingegen weisen einen eindeutigen Zusammenhang auf.

Die Unterschiede in der Beeinflussung durch den Wind zwischen den Empfängern Dach 1 und Dach 2 sind, obwohl statistisch signifikant, relativ gering (siehe Abbildung 5.24). Dies gilt für den EPE als auch für die ermittelte Positionsabweichung. Es ist jedoch für beide Indikatoren ein größerer Unterschied zum Empfänger im Buchenbestand zu verzeichnen. Somit ist der Einfluss des Windes auf die Positionsbestimmung beim Empfänger 3 geringer. Eine Möglichkeit ist im Verlust der Blätter zu erklären, worauf folgend noch einmal spezieller eingegangen werden soll.

Buchenbestand

Es ist möglich, dass der Wind unterschiedliche Wirkung auf belaubte und unbelaubte Kronen des Buchenbestandes hat. Dies soll mithilfe der Abbildung 5.25, welche auf den einminütigen 3D-Winddaten basiert, geklärt werden. Dabei sind die fünf Monate Oktober 09, November 09, März 10, April 10 und Mai 10 verfügbar.

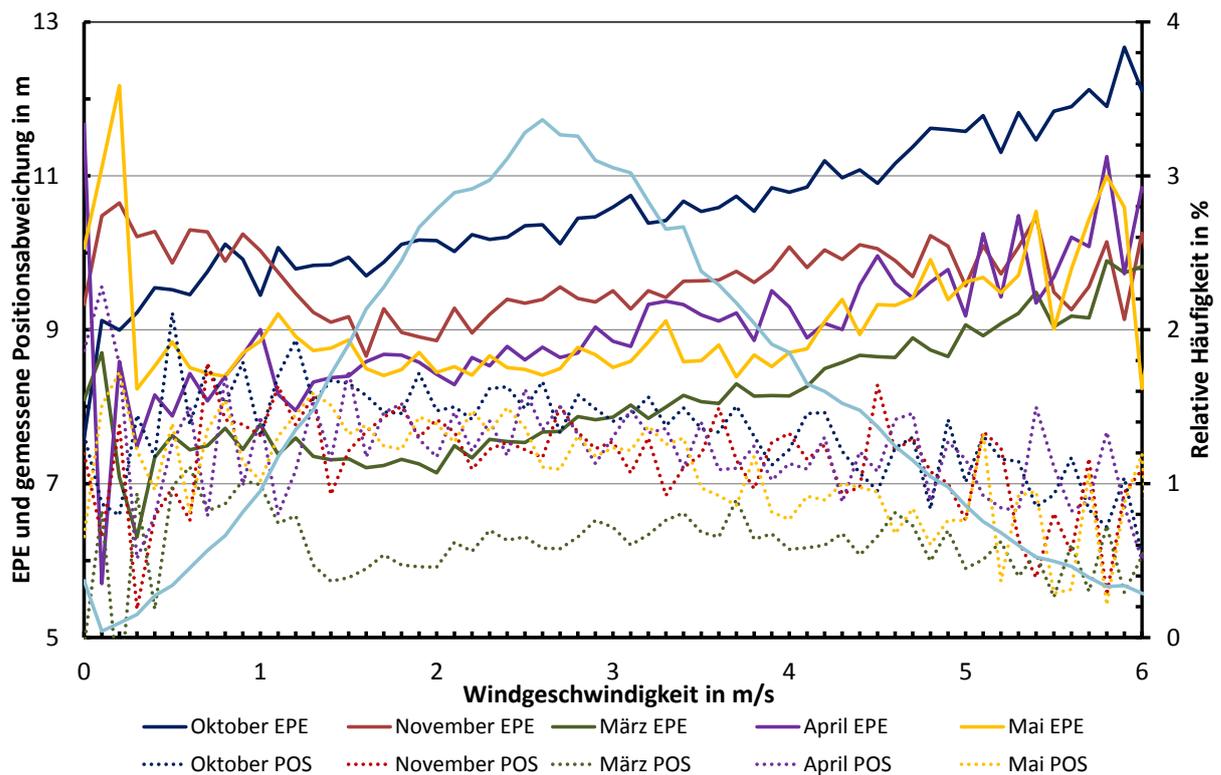


Abbildung 5.25: Monatlicher Einfluss des Windes des Empfänger im Buchenbestand (EPE, Positionsgenauigkeit und Verteilung)

Die Unterschiede zwischen dem EPE ≈ 113 , der Positionsgenauigkeit und ihr gegenläufiges Verhalten sind auch in den verschiedenen Monaten beim Empfänger des Buchenbestandes sichtbar. Dies bestätigt auch der T-Test, welcher alle Monate als signifikant unterschiedlich beschreibt.

In Abbildung 5.25 ist deutlich zu erkennen, dass der einzige komplett laubfreie Monat März, sowohl bei dem EPE als auch bei der tatsächlichen gemessenen Abweichung von der Position die niedrigsten Werte und damit die höchste Genauigkeit erreicht. Die Werte im März ändern sich, im Gegensatz zu den anderen Monaten, nicht signifikant.

Der Einfluss des Windes auf die Positionsgenauigkeit ist als Anpassung an ein quadratisches Modell in Abbildung 5.26 für die Monate getrennt dargestellt. Es wird deutlich, dass in Monaten mit Laubbehang eine Beeinflussung bei der Positionsbildung existiert. Die Ausnahme stellt bei den untersuchten Monaten der Monat März dar, in dem keine Belaubung auf den Bäumen ist. Tabelle 5.8 bestätigt dies anhand der Korrelationskoeffizienten (R) noch einmal. Monate in der Vegetationsperiode weisen ein R von 0,68 (Oktober) bzw. 0,82 (Mai) auf. April und November hingegen korrelieren mit einem R von ca. 0,54. Aus der Rolle fällt dabei der Monat März mit $R=0,13$ und stellt einen sehr geringen bis keinen Zusammenhang zwischen Wind und Positionsgenauigkeit im Winter dar.

Tabelle 5.8: Anpassungsgüte des quadratischen Modells

	R	R^2
Oktober	0,820	0,672
November	0,537	0,288
März	0,126	0,016
April	0,546	0,298
Mai	0,681	0,464

Es ist somit davon auszugehen, dass die Blätter der Laubbäume, welche sich im Wind bewegen und damit die Signale abschirmen und beugen, einen besonderen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit ausüben. Dieser Zusammenhang tritt bei den Nadelgehölzen, welche auch im Winter eine hohe Angriffsfläche für den Wind und eine große Oberfläche (Nadeln) bieten, das ganze Jahr über auf.

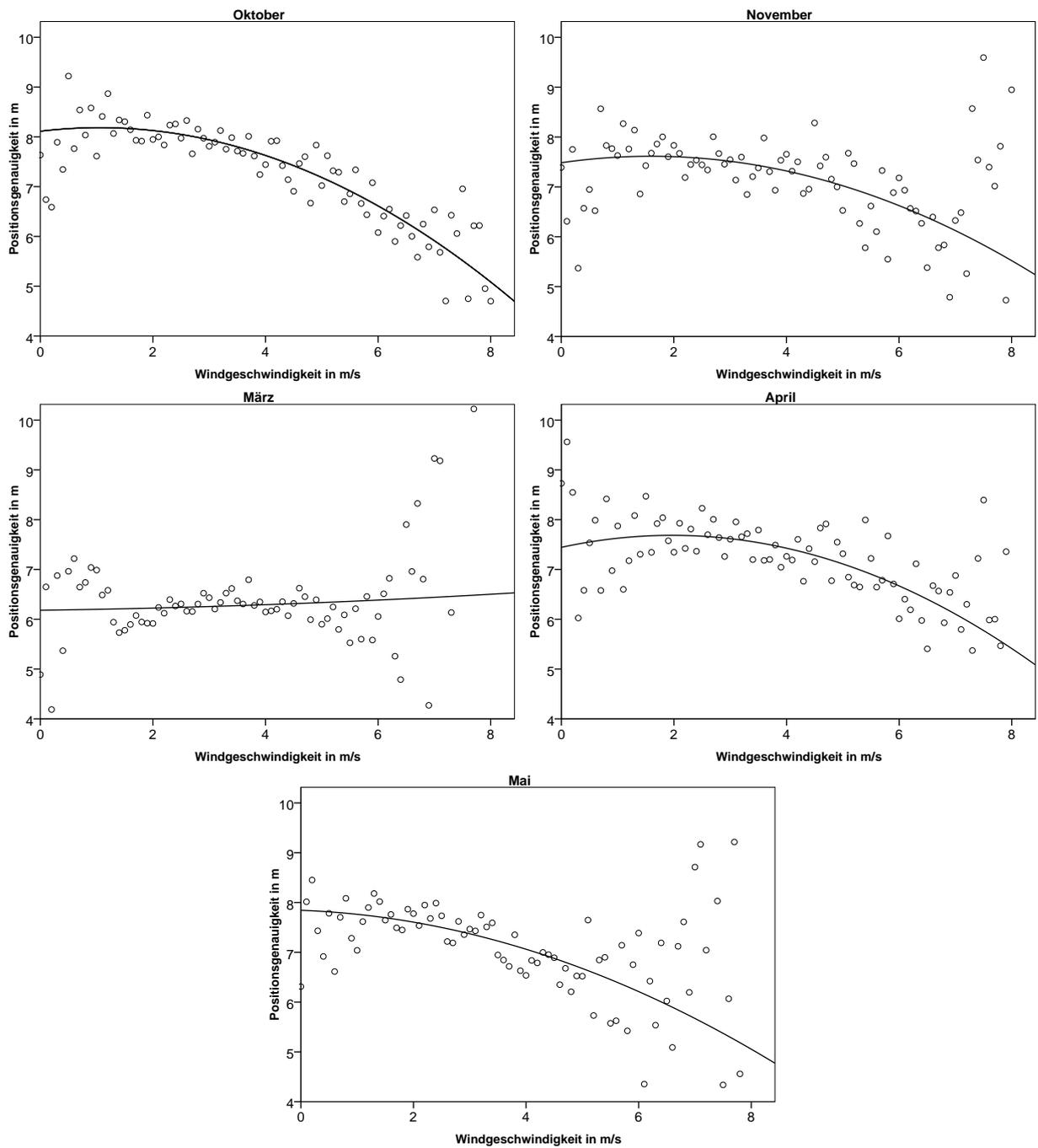


Abbildung 5.26: Modell des monatlichen Einflusses des Windes des Empfängers im Buchenbestand
(Anpassung des quadratischen Modells
Oktober 09, November 09, März 10, April 10, Mai 10)

5.4.5 Einfluss des Niederschlages

Der Einfluss des Niederschlages auf die Positionsgenauigkeit wurde in der Literatur des Öfteren vermutet. Abbildung 5.31 stellt, zur Lösung dieser Frage, die Positionsfehler in Abhängigkeit von dem halbstündlichen Niederschlag in Millimeter dar. Die Auflösung der Messung beträgt dabei 0,1 Millimeter.

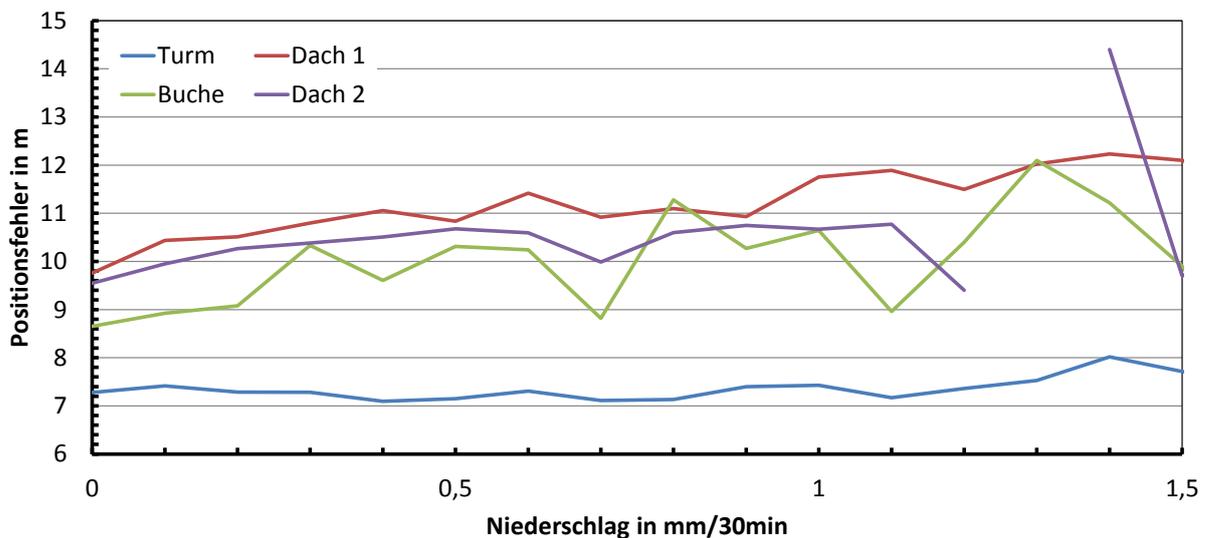


Abbildung 5.27: Einfluss des Niederschlages auf den berechneten Positionerror (EPE)

Bei einer Analyse ist besonders die Verteilung des Niederschlages zu beachten. Diese zeigt Abbildung 5.28. Zur besseren Interpretier- und Lesbarkeit wurden alle vorhandenen Messwerte, welche eine Niederschlagsmenge >0 anzeigen, auf der Sekundärachse separat aufgezeigt.

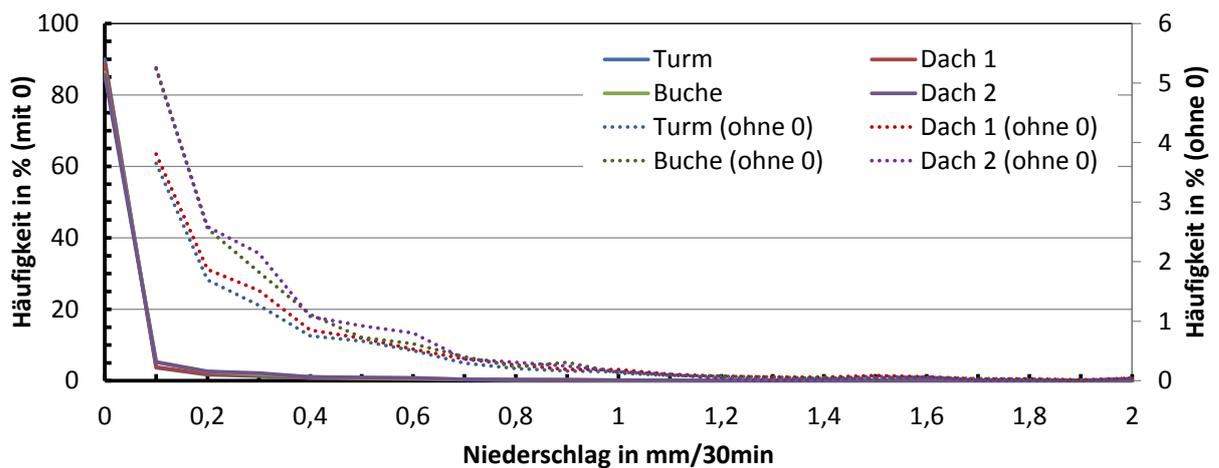


Abbildung 5.28: Verteilung der Niederschlagswerte

Mit ca. 90 % dominiert dabei die Zeit ohne Niederschlag und alle weiteren Angaben sind mit maximal 5 % sehr gering vertreten. Dieses Ungleichgewicht muss bei der Auswertung beachtet werden.

Nach optischer Einschätzung des EPE (Abbildung 5.27) steigt der Positionsfehler mit zunehmenden Niederschlag bei den überschilderten GPS-Empfängern an. Bei der Referenz (Turm) hingegen gibt es keine Veränderung. Dies bestätigen auch die statistischen Kennzahlen. So ist die Korrelation des Niederschlages mit dem Turm nicht signifikant ($p=0,186$) jedoch mit den überschilderten Empfängern (je $p=0,000$).

Die statistischen Tests ergeben, dass 1,3 % (Dach 1), 0,6 % (Buche) bzw. 2 % der Varianz des Positionsfehlers mit den Niederschlägen erklärt werden können. Dies kann bei Regenfällen um die $\frac{1}{30} \frac{mm}{min}$ bis zu 2 m Genauigkeit (Dach 1) ausmachen.

Um zu überprüfen, ob Niederschlag generell einen Einfluss ausübt, wurden die statistischen Tests mit dem Niederschlag als Dummy-Variable ($0 \hat{=}$ kein Niederschlag; $1 \hat{=}$ Niederschlag) getestet. Mit einer Signifikanz von $p=0,000$ ist davon auszugehen, dass es einen Zusammenhang zwischen der Positionsgenauigkeit und dem Fallen eines Niederschlages gibt.

Zu gleichen Ergebnissen führt die Analyse mit den Indikatoren PDOP und „Satellites in track“, welche in den Abbildungen 5.29 und 5.30 dargestellt sind.

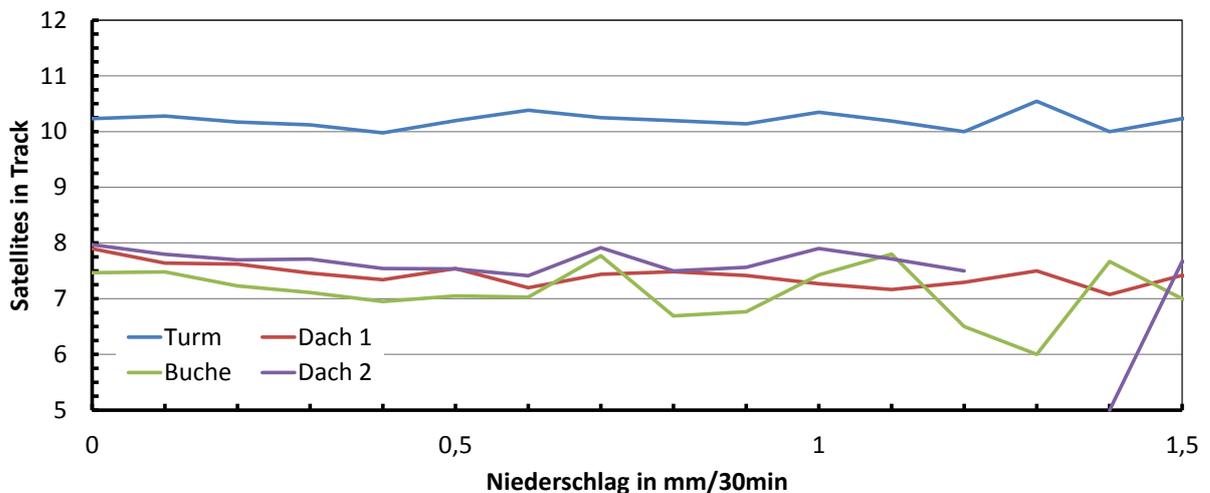


Abbildung 5.29: Einfluss des Niederschlages auf „Satellites in track“

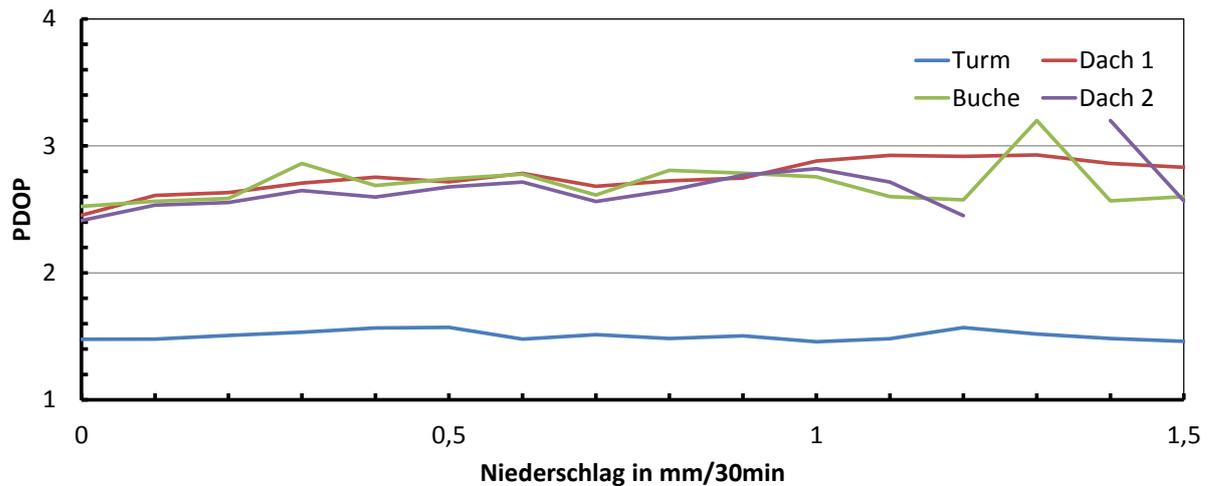


Abbildung 5.30: Einfluss des Niederschlages auf PDOP

5.4.6 Einfluss der Luftfeuchte

Ein weiterer eng mit dem Niederschlag und sehr eng mit der Temperatur korrelierter Einflussfaktor ist die Luftfeuchte. Abbildung 5.31 stellt den Positionsfehler (EPE) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte dar.

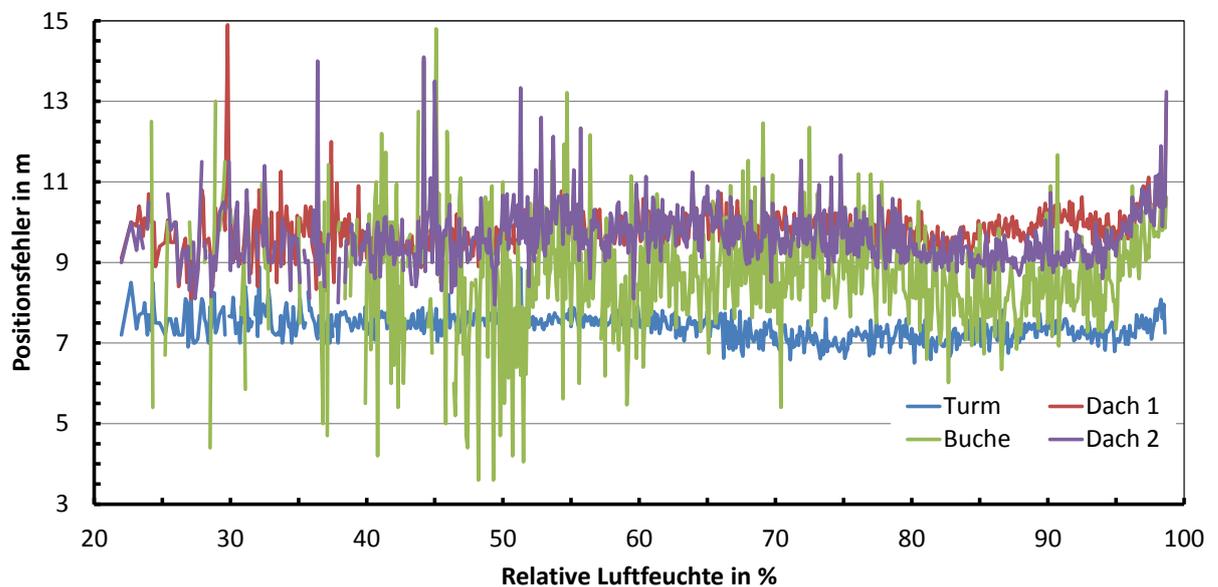


Abbildung 5.31: Einfluss der Luftfeuchte auf den berechneten Positionerror (EPE)

Nach optischer Einschätzung des EPE (Abbildung 5.31), PDOP und „Satellites in track“ (Abbildung 5.32), existieren zwar teilweise starke Schwankungen, es kann jedoch kein Zusammenhang zur Luftfeuchte festgestellt werden. Die statistischen Kennwerte bestätigen dies zum Teil (siehe Tabelle 5.4 und 5.5).

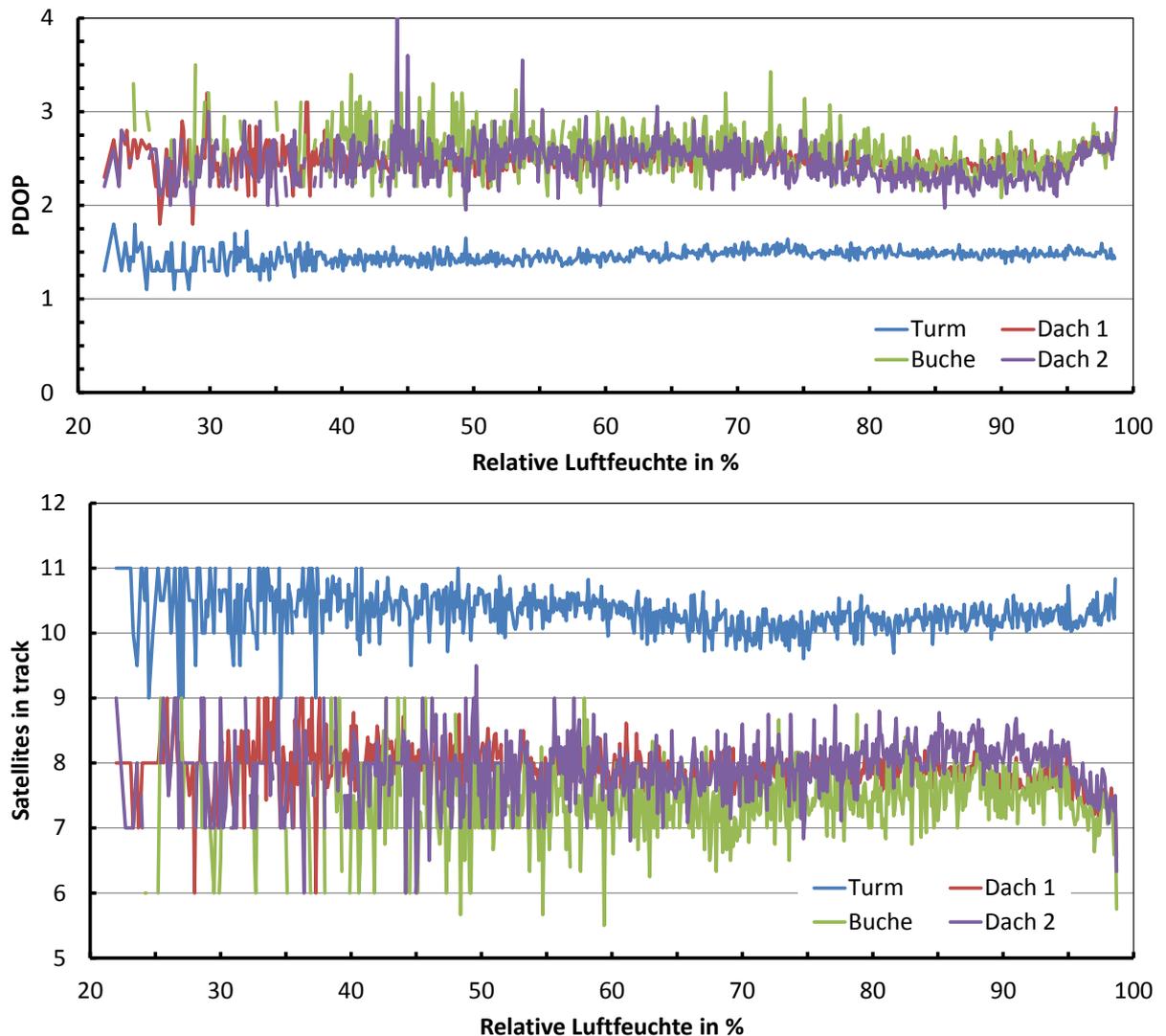


Abbildung 5.32: Einfluss der Luftfeuchte auf PDOP und „Satellites in track“

Die Empfänger 1-3 weisen zwar eine statistisch signifikante Korrelation zwischen der Luftfeuchte und dem EPE auf, die Luftfeuchte erklärt jedoch lediglich 0,4 %, 0,3 % bzw. 0,08 % der Varianz des EPE. Beim Empfänger 4 (Dach 2) ist keine signifikante Korrelation nachweisbar. Ähnlich sehen die Korrelationen mit dem PDOP und den „Satellites in track“ aus. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es sich bei den geringen Zusammenhängen um Kreuz-, Autokorrelationen bzw. systematische Fehler handelt.

Es kann somit festgestellt werden, dass die Positionsgenauigkeit der GPS-Empfänger unabhängig von der relativen Luftfeuchte ist.

5.4.7 Einfluss der Temperatur

Einen weiteren externen Faktor stellt die Umgebungstemperatur dar. Abbildung 5.33 zeigt den Positionsfehler in Abhängigkeit von der Temperatur.

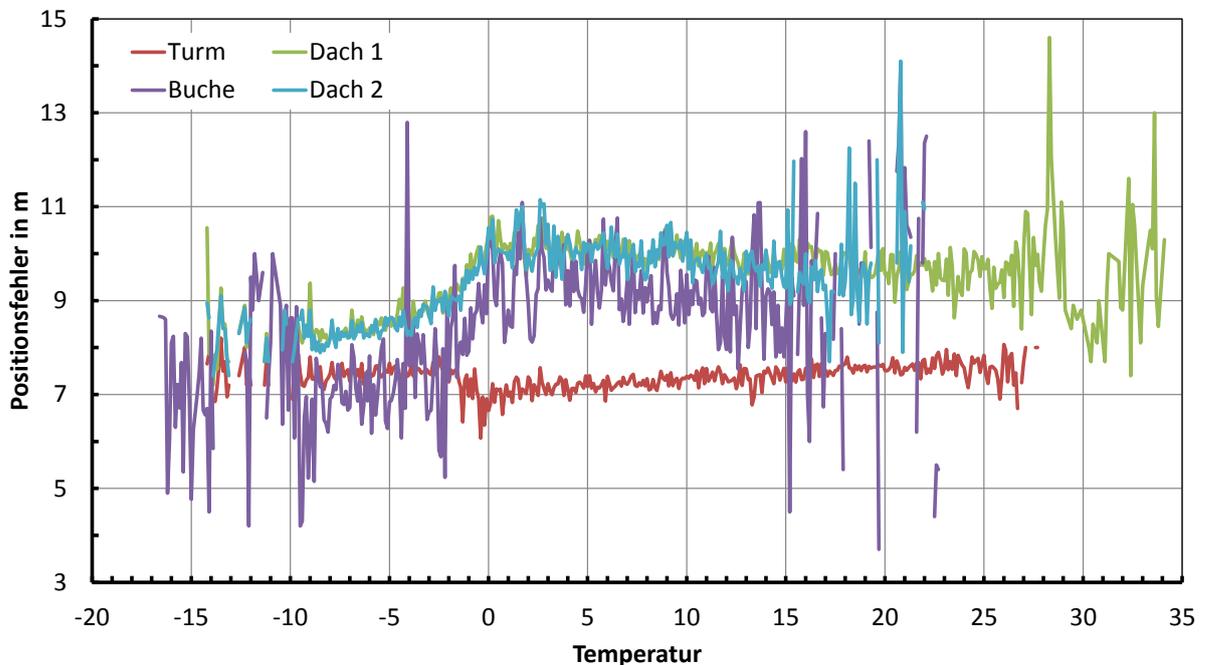


Abbildung 5.33: Einfluss der Temperatur auf den berechneten Positionserror (EPE)

Alle vier Empfänger weisen signifikante Korrelationen ($p=0,000$) mit der Temperatur auf. Dabei erreicht der Turm einen Korrelationskoeffizienten von 0,066, Dach 1 von 0,064, Buche von 0,231 und Dach 2 von 0,271. In Abbildung 5.33 ist optisch jedoch kein Unterschied zwischen den Empfängern Dach 1 und Dach 2 zu verzeichnen. Der stark erhöhte Korrelationskoeffizient von dem Empfänger 4, gegenüber Empfänger 2, lässt sich auf die längere Aufnahmedauer und damit auf eine höhere Schwankung der gemessenen Temperaturen zurückführen. Dies bestätigt, dass bei sehr hohen Stichproben es zu systematischen Fehlern bei statistischen Test kommen kann und diese nicht ungeprüft angewendet werden können.

In Abbildung 5.33 ist deutlich zu erkennen, dass es bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zu einer starken Beeinflussung der Genauigkeit der Position kommt. Nicht nur der EPE sinkt, sondern auch die „Satellites in track“ steigen und die PDOP-Werte sinken in den negativen Temperaturbereich (siehe Abbildung 5.34). Das Phänomen tritt bei allen vier Empfängern auf, wobei die Referenz nur sehr gering betroffen ist und dabei eine Verschlechterung der Position auftritt.

Eine Erklärung für die Verbesserung der Genauigkeit bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes von bis zu zwei Metern ist, dass es durch Wasser und Eisanlagerungen zu günstigeren Beugungs- und Reflektionseffekten kommt. Weiterhin könnte eine eingeschränkte Bewegungsfähigkeit der Bäume im Wind bei einer Vereisung eine Rolle spielen. Dafür spricht

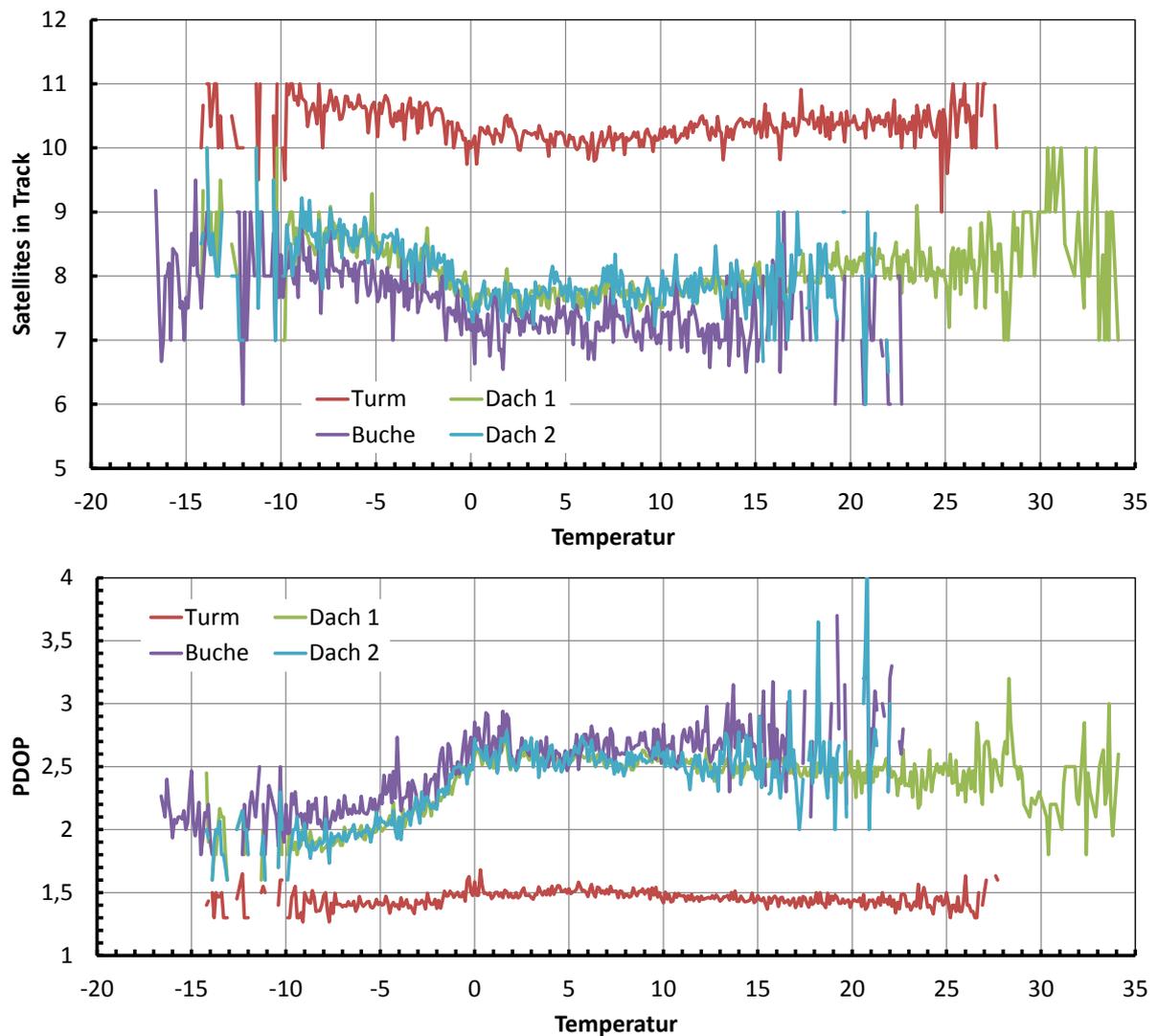


Abbildung 5.34: Einfluss der Temperatur auf PDOP und „Satellites in track“

auch, dass das Phänomen im Buchenbestand, in dem es bei Frost keine Blätter gibt, auftritt, wobei der Empfänger 3 besonders starken Schwankungen bei negativen Temperaturen unterlegen ist. Die Empfänger im Fichtenbestand dagegen weisen bei diesem Effekt eine sehr geringe homogene Streuung auf. Die Kurvenform und der regional eindeutig abgrenzbare Startpunkt des Phänomens stützen diese Theorie.

Die Temperaturen schwanken in relativ langen Zeiträumen (Monaten) sehr stark. Daher könnte eine Ursache für die Unterschiede die Anzahl der verfügbaren Satelliten sein. Um diese Einflussgröße ausschließen zu können, ist in Abbildung 5.35 die Temperatur in Abhängigkeit von den sichtbaren Satelliten einschließlich der Häufigkeitsverteilung der Temperatur dargestellt. Der Einflussfaktor Satellitenverfügbarkeit kann somit ausgeschlossen werden. Abschließend kann der Einfluss dieses Effektes nicht erklärt werden. Es können auch systematische Fehler nicht ausgeschlossen werden. Zur Erklärung bedarf es weiterer Forschung.

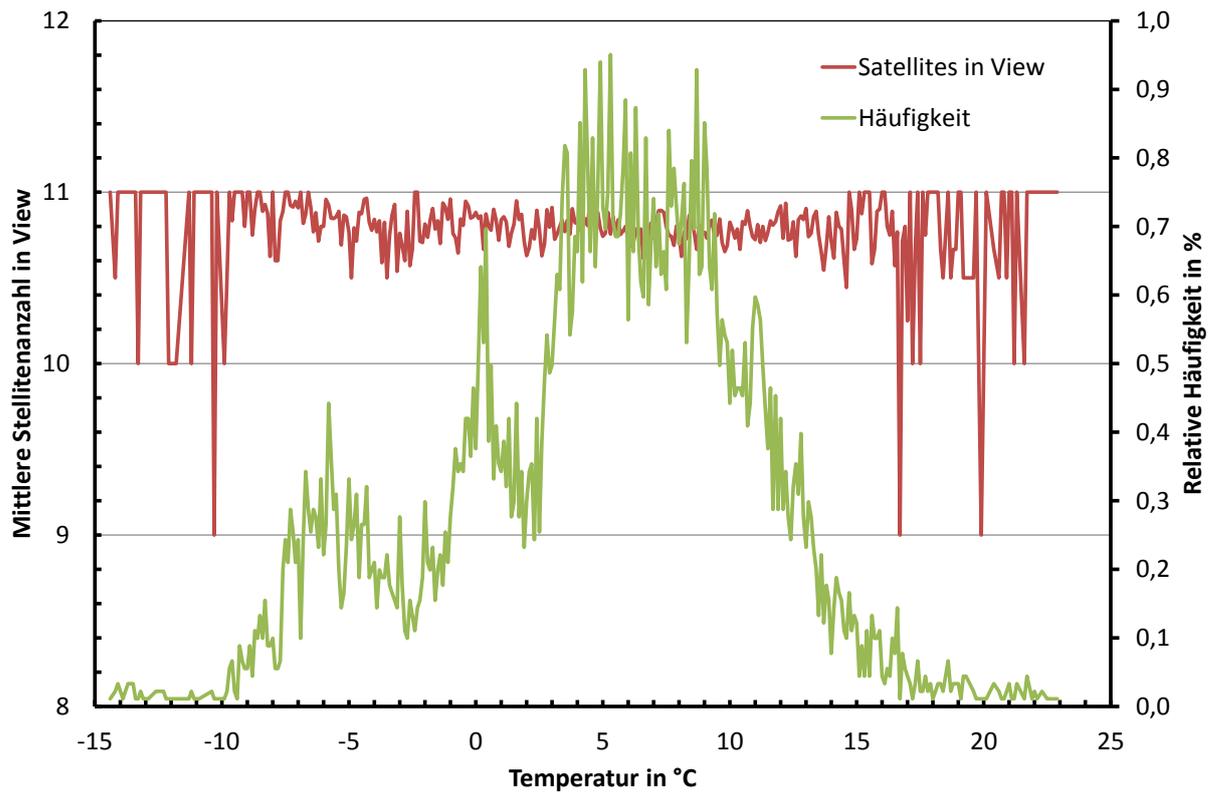


Abbildung 5.35: Zusammenhang von Temperatur und verfügbarer Satellitenanzahl

6 Diskussion

6.1 Methodendiskussion

Versuchsdesign

Das gewählte Versuchsdesign ist grundsätzlich dafür geeignet, die Fragestellungen der vorliegenden Untersuchung zu beantworten.

Es sollten jedoch einige Aspekte kritisch betrachtet werden. So kam es während der Aufnahmen zu mehreren Ausfällen, welche die Auswertung, besonders von sich kontinuierlich ändernden Daten, beeinflusst. Eine intensivere Kontrolle der Messstationen bzw. die Installation eines Warnsystems, welches z. B. den Kontrollstatus per SMS sendet, wäre von Vorteil gewesen.

Die Bestände wurden sorgfältig ausgewählt. Es kommt jedoch zu einer relativ großen räumlichen Trennung (1,27 km) zwischen Fichtenbestand und Buchenbestand, welche aufgrund der Ansprüche von Qualität und Homogenität der Versuchsflächen und den räumlichen Gegebenheiten notwendig war. Diese wird allerdings nur einen geringen Einfluss auf das ermittelte Ergebnis aufweisen. Trotz Sorgfalt bei der Auswahl waren die Bestände nicht wirklich homogen. So befindet sich im Westen des Fichtenbestandes eine Lichtung, die die Signale an dieser Stelle etwas ungehinderter passieren lässt. Im Westen des Buchenbestandes schließt sich in einer Entfernung von 140 m ein Nadelholzbestand an. Beide Einflüsse sind jedoch als gering einzuschätzen und verändern das Ergebnis, wenn überhaupt, nur geringfügig. Die Baumhöhen der beiden Bestände sind bei einer Oberhöhe von 30 m bzw. 24 m nicht gleich. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass dies einen Effekt auf die Messungen ausübt ([HAMBERGER 1999](#); [FIRTH & BROWNLIE 1998](#)).

Die überschirmten GPS-Empfänger wurden aufgrund örtlicher Gegebenheiten in verschiedenen Höhen installiert. So befanden sich die Empfänger „Dach 1“ und „Dach 2“, wie der Name schon sagt, auf dem Dach eines Containers in einer Höhe von ca. 2,5 m über dem Boden. Der Empfänger im Buchenbestand war versuchsbedingt auf einer Höhe von nur einem Meter befestigt. Obwohl die Höhe der Antenne einen Einfluss hat ([GANDASECA ET AL. 2001](#); [SAKAI ET AL. 2006](#)), wird dieser Effekt in der vorliegenden Untersuchung als vernachlässigbar eingeschätzt.

Der GPS-Empfänger auf dem Messturm wurde als Referenz so weit wie möglich frei von Einflüssen installiert (Abbildung 3.4). Bei der Auswertung wurde jedoch ein Bereich der

Abschattung durch die metallene Befestigung anderer Messgeräte festgestellt (Abbildung D.3). Durch eine bessere Positionierung des Empfängers kann dies vermieden werden.

Aufgrund von Vereisung der Wind-Messgeräte wurden drei Wintermonate bei der Auswertung der hochauflösenden Daten nicht berücksichtigt. Eine automatisierte statistische Auswertung barg dabei zu viele Fehlerquellen, so dass sich gegen die Verwendung der Daten entschieden wurde. Mit sehr hohem und zeitnahe Aufwand hätte dem entgegengewirkt werden können.

Verwendete GPS-Empfänger

Die vorhandenen GPS-Empfänger wurden im unkorrigierten Modus verwendet. Der Einsatz von DGPS [↔113](#) könnte eine Qualitätsverbesserung bringen. Über die tatsächliche Verbesserung der Genauigkeit von DGPS im Wald wird jedoch bei der geringen Satellitenanzahl und PDOP-Werte unterschiedlich diskutiert ([DABRINGHAUS 2007](#); [PURFÜRST ET AL. 2007](#); [BÖHME 2010](#)). Laut [KORTH & RESNIK \(2005\)](#) sind die Standardabweichungen im Wald auch mit DGPS nicht wesentlich zu senken.

Die verwendeten GPS-Empfänger sind zwar weitestgehend baugleich, aber zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten erworben. Daher kann ein Hard- bzw. Firmwareunterschied nicht ausgeschlossen werden. Besonders zwischen den Empfängern 1, 2 und den Empfängern 3 und 4 deutet sich ein solcher Unterschied (UEE - User Equipment Error) an, der jedoch in vorliegender Untersuchung nicht quantitativ nachgewiesen werden konnte. Auf den Einsatz von Hybridempfängern, welche durch die Verwendung von z. B. GPS und GLONASS potentiell Satelliten zur Verfügung stehen, wurde aus Kostengründen verzichtet.

Ein Unterschied der vorhandenen Messungen zu den praktischen Positionsmessungen im Wald ist, dass die vorliegenden GPS-Empfänger dauerhaft in Betrieb waren und sich nicht immer wieder neu initialisieren mussten. Dadurch sind Fehler der „Anlaufphase“ nicht berücksichtigt. Die Empfänger waren fest installiert. Vibrationen, wie sie durch die Bedienung bzw. durch die Maschinen auftreten, werden somit nicht simuliert. Das Gleiche gilt für bestimmte Bewegungsmuster. Somit sollten die statisch erhobenen Werte nur bedingt für kinematische Messungen verallgemeinert werden.

Die Empfänger sind in dem schneereichen Winter 09/10 oft von Schnee bedeckt worden. Der Empfänger auf dem Turm wurde wöchentlich gereinigt, wobei dies meist nicht nötig war, da der Wind den Schnee meist beseitigte. Anders war dies bei den übershirmten Empfängern. Besonders der Empfänger im Buchenbestand war durch die schlechte Zugangsmöglichkeit im Winter mit Schnee bedeckt und wurde, so oft es dem Autor möglich war, gereinigt. Dies führt zu einer Beeinflussung der Genauigkeit durch die Schneeeauflage, die nicht näher quantifiziert wurde und nur schwer eingeschätzt werden kann. Für zukünftige Untersuchungen sollten Maßnahmen gegen eine Vereisung und Schneebedeckung (z. B. Beheizung) ergriffen werden.

Auswertung

Die statistischen Tests kommen bei der Anzahl der Variablen an systematische Grenzen der Aussagefähigkeit. So wird schnell eine hohe Signifikanz erreicht, obwohl diese sachlogisch nicht begründbar ist. Darüber hinaus werden eine Vielzahl von Messwerten zur besseren Handhabbarkeit aggregiert. So wurden die 3D-Winddaten ursprünglich mit einer Frequenz von 20 Hz aufgenommen und zu Minutenwerten durch die Verwendung des arithmetischen Mittelwertes zusammengefasst. Bei einer Nicht-Normalverteilung, wie sie auftritt, wird die Grundgesamtheit dadurch verfälscht repräsentiert. Darüber hinaus werden Schwankungen < 1 min nivelliert. Für die Vergleichbarkeit wurden somit auch die GNSS-Daten auf Minutenwerte aggregiert. Dieser Aspekt birgt einen nicht näher quantifizierbaren Fehler und wurde an einem Beispiel bereits im Kapitel 5.4.4 angesprochen.

Darüber hinaus ist nicht genau bekannt, wie die Firma Garmin den EPE im Detail berechnet. Anfragen diesbezüglich blieben inhaltlich unbeantwortet. Die Ergebnisse aus Kapitel 5.4.4 lassen daher teilweise auf einen systematischen Fehler in der Berechnung des EPE schließen. Das Ausmaß kann jedoch nicht näher quantifiziert werden.

6.2 Verallgemeinerungsfähigkeit

Mit dem *Garmin GPS 16* wurden einfache, kostengünstige GPS-Empfänger eingesetzt. Viele Empfangseigenschaften sind auf die Güte der Antenne und auf die intern verarbeitende Software zurückzuführen. Diese sind sehr herstellerepezifisch. Die vorliegenden Ergebnisse können somit nur bedingt für andere Empfänger verallgemeinert werden. Grundlegende physikalische Sachverhalte wie Signalbeugung, -reflexion und -abschirmung und deren Veränderung durch externe Faktoren wirken jedoch auf die Empfänger gleich. Diese können daher in der Sache als verallgemeinerbar gelten.

Satellitenanzahl

Die Anzahl der zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten streut bei den Messungen relativ stark. FALKENRIED (2004) gibt im Wald eine maximale Satellitenanzahl von 6-7 Satelliten an. Diese Anzahl wurde in vorliegender Untersuchung deutlich übertroffen, indem ca. 80% der überschirmten Empfänger mehr als sechs und ca. 50% mehr als sieben Satelliten „in track“ aufweisen (siehe Abbildung 5.14).

Auch beim PDOP wurden im Vergleich zu FALKENRIED (2004) günstigere Werte ermittelt. Er beschreibt bei seinen Messungen maximale PDOP-Werte von 3-4. In vorliegender Untersuchung hingegen sind 80% aller überschirmten PDOP-Werte besser als drei (siehe Abbildung 5.15), was in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von MARTIN ET AL. (2000) steht.

Die Annahme, dass Satelliten unterhalb von 15° verworfen werden sollten, wie dies theoretisch hergeleitet wurde (Kapitel 2.3.1) und aus der Literatur bekannt ist (GANDASECA ET AL. 2001; GREIFENEDER 2005), kann auch für den Wald bestätigt werden. Die meisten Satelliten unter diesem Winkel weisen ein zu geringes Satelliten-Rausch-Verhältnis auf und werden nicht zur Positionsbildung verwendet (siehe Abbildung 5.7).

Wind

Der Einflussfaktor Wind spielt eine wesentliche Rolle bei der Veränderung der Positionsgenauigkeit. Im Gegensatz zur Literatur konnte allerdings keine Verschlechterung, sondern eher eine Verbesserung festgestellt werden. Somit widersprechen die gemessenen Ergebnisse vorliegender Untersuchung den beurteilten Erkenntnissen von ENGELS (2001), GIMPL (2002) und SIGRIST ET AL. (1999).

In vorliegender Arbeit wurden die Daten über lange Zeiträume mit einem statischen Empfänger aufgenommen. Die Position muss daher auch bei hohen Windgeschwindigkeiten nicht neu initialisiert bzw. „gefunden“ werden. Im Gegensatz zu Kurzzeitmessungen (FALKENRIED 2004; LÜKE & HEELING 1996) können daher Unterschiede in der Beurteilung der Windgeschwindigkeit auftreten. So gibt LUCAS (2007) eine Optimum-Anzahl an Messwerten von 250-500 an.

Überschirmung

Baumstämme stellen in der Signalabschwächung einen entscheidenden Faktor dar (siehe Kapitel 5.4.3 und Abbildungen 5.16 und 5.17), was durch die immer noch starke Abschwächung der Signale im unbelaubten Buchenbestand bestätigt wird. Dies entspricht auch der Annahme von HAMBERGER (1996). FALKENRIED (2004) nennt als Hauptursache den durch dünnen Ästen und Blättern ausgelösten Multipath-Effekt (SIGRIST ET AL. 1999). Eine Verschlechterung der Signale findet auf jeden Fall durch die Belaubung statt, die Ursache konnte aber nicht abschließend geklärt werden. Eine Trennung von Multipath-Effekt, Signalbeugung und -abschirmung war aufgrund der geringen Informationsdichte des verwendeten NMEA-Codes nicht möglich. Für solche Untersuchungen muss mit geodätischen Empfängern direkt das tatsächliche Satellitensignal untersucht werden.

Der Überschirmungsgrad hat einen entscheidenden Einfluss auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern, was besonders im Laubholz nachgewiesen werden konnte. Dies steht in Einklang mit HOLDEN ET AL. (2001), die bei geringer Überschirmung eine zwei- bis dreimal schlechtere Genauigkeit und bei starker Überschirmung eine fünf- bis siebenmal schlechtere Genauigkeit im Bezug zur Freifläche feststellen.

Zur Bestimmung des Überschirmungsgrades empfehlen MOSKAL ET AL. (2009) LIDAR statt Photos einzusetzen. Nach den Erkenntnissen vorliegender Untersuchung reicht für eine Analyse die Verwendung von Photos mit anschließender Auswertung nach der Methode SCHWALBE ET AL. (2006) aus.

Niederschlag und Luftfeuchtigkeit

In der Literatur ist der Zusammenhang zwischen Niederschlag und der Positionsgenauigkeit beschrieben (LÜKE & HEELING 1996; OEFVERBERG 1995). Dies kann auch durch die vorliegende Untersuchung bestätigt werden, wobei der Einfluss relativ gering ist.

Ein Zusammenhang zwischen der Luftfeuchtigkeit und der Positionsgenauigkeit konnte nicht festgestellt werden. Dies steht im Gegensatz zu den Aussagen von HAMBERGER (2001), KETTEMANN (1995) und KORTH & RESNIK (2005), die der Luftfeuchtigkeit eine erhöhte Dämpfung und Beugung der Signale zuschreiben. Ähnlich berechneten es auch KOH & SARABANDI (2002a, b) bei ihrer modellhaften Analyse der Wirkung von Baumkronen auf die Signalqualität.

Waldtyp

Der Behauptung von NAUMANN ET AL. (2003), dass kahle Äste einen größeren Einfluss auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung als das Laubdach hätten und die Messung im unbelaubten Zustand schwieriger sei, kann sich auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse nicht angeschlossen werden (siehe Kapitel 5.4.3). Dies gilt auch für die Aussage von HAMBERGER (1999) und TUCEK & LIGOS (2002), dass die Positionsgenauigkeit im Nadelholz besser als im Laubholz ist.

Vorliegende Untersuchung hat gezeigt, dass dies differenziert zu bewerten ist. Im Winter kehrt sich dieses Verhältnis der Positionsgenauigkeit zwischen Laub- und Nadelbestand teilweise um. Dem schließen sich auch KORTH & RESNIK (2005) mit ihrer Aussage, dass im unbelaubten Zustand mit einem 15-20-prozentigen Genauigkeitsvorteil zu rechnen ist, analog zu KENNEDY (1997) an.

6.3 Thesen

Die in Kapitel 1.4 gestellten Arbeitshypothesen sollen folgend kurz diskutiert werden.

1. **Der Wald hat Einfluss auf die Qualität der GNSS-Positionsbestimmung.**

Es konnte klar nachgewiesen werden, dass der Wald einen enormen Einfluss auf die Qualität der Positionsgenauigkeit ausübt (siehe auch Tabelle 5.2) und diese um ein Mehrfaches verringern kann.

Die These wird weiterhin unterstützt.

2. **Es gibt Unterschiede in der Positionsgenauigkeit zwischen Laub- und Nadelholzbeständen.**

Die Positionsgenauigkeit von Laubholz (Buchen-Reinbestand) unterscheidet sich signifikant von der eines Nadelbestandes (Fichten-Reinbestand), wenn auch teilweise nur geringfügig (siehe Tabelle 5.2 und Kapitel 5.3 und 5.4.3). Dabei muss jedoch noch näher zwischen den Jahreszeiten (Laubfall) unterschieden werden.

Die These wird weiterhin unterstützt.

3. **Die Positionsgenauigkeit in Laubholzbeständen ist im belaubten Zustand geringer als im unbelaubten Zustand.**

Die Positionsgenauigkeit steigt aufgrund des geringeren Überschirmungsgrades (ca. 5% statt 90%) deutlich an (siehe Kapitel 5.4.3). Es kann deutlich zwischen nicht belaubten, belaubten und Übergangs-Monaten unterschieden werden.

Die These wird weiterhin unterstützt.

4. ~~Bei hoher Luftfeuchte verschlechtert sich die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern im Wald.~~

Es konnte kein Effekt der Luftfeuchtigkeit auf die Positionsgenauigkeit nachgewiesen werden (siehe Kapitel 5.4.6).

Die These wird verworfen.

5. **Bei Niederschlag verschlechtert sich die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern im Wald.**

Es konnte eine signifikante Verringerung der Positionsgenauigkeit bei Niederschlag nachgewiesen werden (siehe Kapitel 5.4.5).

Die These wird weiterhin unterstützt.

6. ~~Bei Wind verschlechtert sich die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern im Wald.~~

Es konnte eine Veränderung der Positionsgenauigkeit bei Wind festgestellt werden (siehe Kapitel 5.4.4). Diese muss jedoch nicht zwangsläufig schlechter sein. Bei höheren Windgeschwindigkeiten sinkt die Präzision der Positionsmessung, die Richtigkeit hingegen steigt an.

Die These wird somit in der dargestellten Form verworfen.

Es kann jedoch aus den Erkenntnissen vorliegender Untersuchung eine neue allgemeinere These formuliert werden:

Der Wind hat einen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern im Wald.

7. **Die Temperatur hat einen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Empfängern im Wald.**

Es konnte eine Veränderung der Positionsgenauigkeit bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes festgestellt werden (siehe Kapitel 5.4.7).

Die These wird weiterhin unterstützt.

Als Resumé können fünf der sieben Hypothesen als Thesen bestätigt und eine neu formuliert werden.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Empfangsverhältnisse sind wie vieles im Wald sehr inhomogen. Dabei sind, je nach Situation, sowohl hohe als auch geringe Genauigkeiten möglich. Das Problem ist die Vorhersagbarkeit dieser Ereignisse.

Bei der Durchführung von Messungen kann sich nach den vorliegenden Untersuchungen den Hinweisen von [MCLACHLAN \(2002\)](#) angeschlossen bzw. ergänzt werden. Er schlägt mehrere Maßnahmen vor, deren Beachtung die Qualität erhöhen können. Es sollten

- keine geringen SNR-Werte genutzt werden,
- ein HDOP-Filter eingesetzt werden,
- wenn möglich immer Post-Processing durchgeführt werden,
- eine Missionsplanung nach Satellitenkonstellation erfolgen,
- schlechte Wetterbedingungen gemieden werden,
- auch andere Datenerhebungsmethoden als Kalibrierung eingesetzt werden,
- Abwägungen zwischen Produktivität und Präzision bzw. Genauigkeit der Messdaten erfolgen,
- geeignete Geräte eingesetzt werden, welche vorher getestet wurden,
- die Metadatenhaltung nicht vernachlässigt werden.

Präzisiert auf die Ergebnisse vorliegender Arbeit ist zu empfehlen, Vermessungen möglichst im Winter bei kalten Temperaturen und bei geringen Windgeschwindigkeiten, wenn möglich in Bestandeslücken mit geringer Überschildung, durchzuführen.

Die Etablierung des europäischen Satellitennavigationsdienstes GALILEO [113](#) wird einen Zugewinn an verfügbaren Satelliten, vor allem für Hybridempfänger, bedeuten. Jedoch basiert auch GALILEO auf dem gleichen physikalischen Prinzip mit ähnlichen Frequenzbereichen wie der in vorliegender Arbeit untersuchte Navigationsdienst GPS NAVSTAR. Die Einflüsse des Waldes und des Wetters bleiben jedoch erhalten. Es ist wahrscheinlich eine Steigerung der Genauigkeit zu erwarten, aber das Ziel des flächendeckenden Submeterbereiches wird nicht erreicht werden.

Um die Positionsgenauigkeit zu erhöhen sollte weiter an einer Kombination von GNSS mit weiterer Sensorik wie z. B. Inertialsensorik oder einem lokalen Radarsystem (BLOHM & GILLET 2003; MOSTAFA ET AL. 2001; PURFÜRST ET AL. 2007; REUTEBUCH ET AL. 2001) geforscht werden.

Auch nach der vorliegenden Arbeit stehen noch viele Fragen zum quantitativen Einfluss des Waldes auf die Positionsgenauigkeit aus. Daher sollte die Forschung weitergeführt werden, um Methoden zu entwickeln, wie den Nachteilen der Einwirkung des Kronendaches entgegengewirkt werden kann. Eine genaue Positionsbestimmung im Wald ist, besonders in der Forstwirtschaft, absolut notwendig.

Tabellenverzeichnis

3.1	Versuchsanordnung GPS-Empfänger	27
3.2	Erfasste NMEA 0183 Datensätze	29
4.1	Verwendete Positions-Informationen der NMEA Datensätze	37
4.2	Verwendete Satelliten-Informationen der NMEA Datensätze	37
4.3	Verwendete Hardware für die Datenauswertung	43
5.1	Übersicht über die Daten	53
5.2	Ermittelte Positionen der GPS-Empfänger	54
5.3	Streuung der Positionen	56
5.4	Korrelationskoeffizienten und Signifikanz der externen Faktoren I	64
5.5	Korrelationskoeffizienten und Signifikanz der externen Faktoren II	65
5.6	Einfluss des Windes auf den EPE und die Positionsgenauigkeit I	77
5.7	Einfluss des Windes auf den EPE und die Positionsgenauigkeit II	77
5.8	Anpassungsgüte des quadratischen Modells	79

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung des PDOP	5
2.2	Multipath-Effekt durch die Bäume	8
2.3	Abschirmungs-Effekt durch die Bäume	9
2.4	Theoretischer Bestandes-Signaldurchlauf in Abhängigkeit vom Elevationswinkel	10
2.5	Einfluss des Korrektursignales bei kinematischer Messung	11
2.6	Versuche von Dabringhaus	13
2.7	Genauigkeit von GNSS bei Harvesteraufzeichnung	14
2.8	Abhängigkeit der Schwankung von der Abschattung	15
2.9	Abhängigkeit der Schwankung vom Waldtyp	17
2.10	Schematische Darstellung des PDOP	18
2.11	Einfluss eines Baumes auf die Beugung von Satellitensignalen	19
3.1	Garmin GPS 16	21
3.2	Topcon Legacy E mit PGA1-Antenne	22
3.3	Lage der zwei Versuchsflächen im Untersuchungsgebiet Tharandter Wald	23
3.4	Messturm der Versuchsanlage Ökologisches Versuchsmessfeld	24
3.5	Darstellung der Versuchsanlage Ökologisches Versuchsmessfeld	24
3.6	GPS-Empfänger im Buchenbestand	25
3.7	Darstellung der Anordnung der vier GPS-Empfänger	26
3.8	GPS-Empfänger auf dem Messturm	27
3.9	Übersicht über die Datenerhebung und die -verarbeitung	28
3.10	Anschluss-Schaltbild des Ökologischen Versuchsmessfeldes	30
3.11	GPS-Empfänger im Buchenbestand	31
3.12	Anschluss-Schaltbild des Buchenbestandes	31
3.13	3D-Ultraschall-Anemometer und Schalen-Anemometer des Messturmes	32
3.14	Luftfeuchte- und Temperaturmessung auf dem Ökologischen Messfeld	34
3.15	Niederschlagsmessung auf dem Ökologischen Messfeld	34
3.16	Klassifizierung der Kronenbilder	35
4.1	Ladefunktion der Software „GNSS_Analyser“	38
4.2	Grundlegendes EER-Diagramm der Datenbank	41
4.3	Beispiel aller aufgenommenen Satellitenpositionen im rechteckigen Skyplot	48
4.4	Beispiele für 2D-Skyplots	49
4.5	Beispiele für 3D-Skyplots	50

5.1	Zeitliche Darstellung der verfügbaren Empfängerdaten	52
5.2	2D-Positionsdaten Turm	55
5.3	Standardabweichung GNSS-Empfänger im Verlauf der Zeit	57
5.4	Dispersionsmaße der GPS-Empfänger nach Himmelsrichtung	57
5.5	Histogramm der Positionsgenauigkeit	58
5.6	Signal-Rausch-Verhältnis der Gesamtdaten der vier Empfänger	59
5.7	Mittleres Signal-Rausch-Verhältnis bei unterschiedlichen Elevationswinkeln	60
5.8	Mittleres Signal-Rausch-Verhältnis bei unterschiedlichen Azimuthwinkeln	61
5.9	Mittleres Satelliten-Rausch-Verhältnis im Verlauf der Zeit	62
5.10	Satelliten-Rausch-Verhältnis des Empfängers 1 (Turm)	62
5.11	Satelliten-Rausch-Verhältnis des Empfängers 2	63
5.12	Wind und Temperatur im Verlauf der Zeit	66
5.13	Niederschlag und relative Luftfeuchtigkeit im Verlauf der Zeit	66
5.14	Verfügbarkeit der verwendeten Satelliten im Messzeitraum	67
5.15	Histogramm PDOP der verschiedenen GNSS-Empfänger	68
5.16	Projektion der Satellitenstärke auf ein Fisheye-Bild (Dach 1)	69
5.17	Projektion der Satellitenstärke auf ein Fisheye-Bild (Buche)	70
5.18	Vergleich Zustand der Buchenkrone über GPS-Empfänger	71
5.19	Überschirmungsgrad der Buchenkrone im Verlauf der Zeit	72
5.20	Histogramm SNR-Werte im Verlauf der Zeit des Empfängers 3 (Buche)	72
5.21	Kennwerte der Empfänger 2 im Verlauf der Zeit	73
5.22	Satellitenstärke nach Monaten des Empfängers im 2 (Buche)	74
5.23	Verteilung der Windgeschwindigkeiten	75
5.24	Einfluss des Windes auf den EPE und der Positionsgenauigkeit	76
5.25	Monatlicher Einfluss des Windes des Empfänger im Buchenbestand	78
5.26	Modell des Einflusses des Windes des Empfängers im Buchenbestand	80
5.27	Einfluss des Niederschlages auf den berechneten Positionerror (EPE)	81
5.28	Verteilung der Niederschlagswerte	81
5.29	Einfluss des Niederschlages auf „Satellites in track“	82
5.30	Einfluss des Niederschlages auf PDOP	83
5.31	Einfluss der Luftfeuchte auf den berechneten Positionerror (EPE)	83
5.32	Einfluss der Luftfeuchte auf PDOP und „Satellites in track“	84
5.33	Einfluss der Temperatur auf den berechneten Positionerror (EPE)	85
5.34	Einfluss der Temperatur auf PDOP und „Satellites in track“	86
5.35	Zusammenhang von Temperatur und verfügbarer Satellitenanzahl	87
A.1	Versuchsfläche	120
A.2	Überschirmung über GPS-Empfänger „Dach 1“, „Dach 2“	121
A.3	Zustand der Buchen-Krone über GPS-Empfänger I	121
A.4	Zustand der Buchen-Krone über GPS-Empfänger II	122
A.5	Zustand der Buchen-Krone über GPS-Empfänger III	122
A.6	Zustand der Buchen-Krone über GPS-Empfänger IV	122

B.1	SNR der vier Empfänger zu unterschiedlichen Zeitpunkten	123
B.2	Variation der monatlichen Temperatur	124
B.3	Variation des monatlichen Niederschlages	124
B.4	Variation des monatlichen Luftfeuchtigkeit	125
B.5	Variation der monatlichen mittleren Windstärke	125
B.6	Einfluss des Windes auf den PDOP	126
B.7	Einfluss des Windes auf die Satelliten „in view“ bzw. „in track“	126
C.1	Histogramm von Hoch- und Rechtwertes der verschiedenen GNSS-Empfänger	127
C.2	Standardabweichung GNSS-Empfänger im Verlauf der Zeit	128
C.3	Positionsdaten I	129
C.4	Positionsdaten II	130
D.1	Verteilung Satelliten nach Elevation und Azimuthwinkel	131
D.2	Verteilung der registrierten Satelliten (PRN-Nummern)	132
D.3	Satellitenrauschverhältnis I in dB des Empfänger 1 (Turm)	133
D.4	Satellitenrauschverhältnis I in dB des Empfänger 2 (Dach 1)	134
D.5	Satellitenrauschverhältnis I in dB des Empfänger 3 (Buche)	135
D.6	Satellitenrauschverhältnis I in dB des Empfänger 4 (Dach 2)	136
D.7	Satellitenrauschverhältnis I in dB aller Empfänger zusammen	137
D.8	Satellitenrauschverhältnis II in dB des Empfänger 1 (Turm)	138
D.9	Satellitenrauschverhältnis II in dB des Empfänger 2 (Dach 1)	139
D.10	Satellitenrauschverhältnis II in dB des Empfänger 3 (Buche)	140
D.11	Satellitenrauschverhältnis II in dB des Empfänger 4 (Dach 2)	141
D.12	Satellitenrauschverhältnis II in dB aller Empfänger zusammen	142
D.13	Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse I	143
D.14	Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse II	144
D.15	Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse III	145
D.16	Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse IV	146
D.17	Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse V	147
D.18	Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse VI	148
D.19	Satellitenstärke nach Monaten des Empfängers im 2 (Buche)	149
D.20	Satellitenstärke nach Monaten des Empfängers im 2 (Buche)	150
E.1	Histogramm Horizontaler Fehler der verschiedenen GNSS-Empfänger	151
E.2	Histogramm Vertikaler Fehler der verschiedenen GNSS-Empfänger	151
E.3	Histogramm Posistionsfehler der verschiedenen GNSS-Empfänger	152
E.4	Histogramm PDOP der verschiedenen GNSS-Empfänger	152
G.1	Technische Spezifikationen Garmin GPS 16	155
G.2	Technische Spezifikationen Topcon Legacy E	156
G.3	Verwendete Einstellungen Garmin GPS 16	156

Formelverzeichnis

2.1	Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses	6
2.2	Grundlegende Berechnung verschiedener EPE-Fehler	7
3.1	Berechnung der Windgeschwindigkeit	33
4.1	Berechnung der Positionsdifferenzen zweier Empfänger	44
4.2	Berechnung Mittlere Positionsgenauigkeit	46
4.3	Berechnung der verzerrten 2D-Koordinaten der Satelliten	49
4.4	Berechnung der 3D-Koordinaten der Satelliten	50

SQL-Anweisungsverzeichnis

4.1	Beispiel für Insert SQL-Anweisung	39
4.2	Einladen der Wetterdaten	40
4.3	Beispiel für die Aggregation der Satellitendaten	42
4.4	SQL-Anweisung zur Eliminierung der Ausreißer	45
4.5	Beispiel für die Erzeugung von Differenz-Positionsdaten	51
4.6	Beispiel für die Verbindung von Postitions- und Wetterdaten	51
F.1	Beispiel für die Erzeugung der von Differenz-Satellitendaten	153
F.2	Beispiel für die Erzeugung der SkyPlot-Daten	153
F.3	Beispiel für die Erzeugung von zeitlich gruppierten Daten	153
F.4	Beispiel für die 30-Minuten Gruppierung von Differenz-Postitionsdaten	154

Quellenverzeichnis

ANONYMOUS 2010

ANONYMOUS: *User defined functions (UDF) to enhance the functionality of the MySQL® database server*. <http://mysql-udf.sourceforge.net/>. Version: 2010. – abgerufen am 10.03.2010 (zitiert auf Seite 41)

BAUER 2003

BAUER, M.: *Vermessung und Ortung mit Satelliten: GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. Herbert Wichmann Verlag, 2003 (zitiert auf Seite 4)

BÖHME 2010

BÖHME, I.: *Prüfung der GNSS - Aufzeichnungen der Fahrlinie am Beispiel eines Harvesters*, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2010 (zitiert auf den Seiten 2, 11, 13, 14, 16 und 89)

BLOHM & GILLET 2003

BLOHM, M. ; GILLET, J.: Ground navigation Through the Use of Inertial Measurements, a UXO Survey. In: *Precision Forestry - Proceedings of the Second International Precision Forestry Symposium*, 2003 (zitiert auf Seite 96)

BOX & COX 1964

BOX, G.E.P. ; COX, D.R.: An analysis of transformations. In: *Journal of the Royal Statistical Society, Serie B* 26 (1964), Nr. 2, S. 211–252. – ISSN 1369–7412 (zitiert auf Seite 44)

BOX & TWIDELL 1962

BOX, G.E.P. ; TWIDELL, P.W.: Transformations of the independent variables. In: *Technometrics* 4 (1962), Nr. 4, S. 531–550. – ISSN 0040–1706 (zitiert auf Seite 44)

CORDERA ET AL. 2006

CORDERA, R. ; MARDONES, O. ; MARICORENA, M.: Evaluation of forestry machinery performance in harvesting operations using GPS technology. In: *Precision Forestry in plantations, semi-natural and natural forests. Proceedings of the International Precision Forestry Symposium, Stellenbosch University, South Africa, March 2006*, 2006 (zitiert auf Seite 1)

DABRINGHAUS 2007

DABRINGHAUS, C.: *Genauigkeitsuntersuchung zwischen high- und low-cost GPS-Geräten im kinematischen Modus*, Technische Universität Dresden, Professur für Forsttechnik, Diplomarbeit, 2007 (zitiert auf den Seiten 2, 8, 13 und 89)

DAFFNER 2001

DAFFNER, B.: *Koordinatenoptimierung bei kinematischen GPS-Messungen auf Forstmaschinen*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2001 (zitiert auf Seite 13)

DOMINY & DUNCAN 2001

DOMINY, N. J. ; DUNCAN, B.: GPS and GIS methods in an African rain forest: applications to tropical ecology and conservation. In: *Conservation Ecology* 5 (2001), Nr. 2. <http://www.consecol.org/vol5/iss2/art6/> (zitiert auf den Seiten 11, 17 und 18)

DRAPER & SMITH 1981

DRAPER, N.R. ; SMITH, H.: *Applied Regression Analysis*. 2. John Wiley and Sons, New York, 1981. – ISBN 0-471-02995-5 (zitiert auf Seite 46)

EICHELMANN 2005

EICHELMANN, U.: *Stationsansicht Ökomessfeld*. http://web-redaktion.tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/ifhm/meteorologie/forschung/stationen/bilder/station_oemf/image_view.
Version: 2005. – abgerufen am 01.09.2010 (zitiert auf Seite 24)

ENGELS 2001

ENGELS, F.: Anforderungen an ein GPS-Gerät beim Einsatz im forstlichen Versuchswesen. In: *AFZ-Der Wald* (2001), Nr. 10, S. 513–516 (zitiert auf den Seiten 18 und 91)

ERLER 2008

ERLER, J.: Navigation von Forstmaschinen in greifbarer Nähe. In: *Forst und Holz* (2008) (zitiert auf Seite 1)

ERLER ET AL. 2004A

ERLER, J. ; GÜLDNER, O. ; HÜCKEL, N. ; KÜHNEL, J. ; KLINGER, O. ; PURFÜRST, F. T. ; KLAUS, J.: Pfleglichkeit von Forstmaschinen - Anlage von Feinerschließungssystemen; Befahrungsdokumentation und Navigation mithilfe von GNSS. In: *Tagungsband KWF-Tagung 2004*, 2004 (zitiert auf den Seiten 1, 2 und 12)

ERLER ET AL. 2004B

ERLER, J. ; PURFÜRST, F.T. ; GÜLDNER, O.: Erprobung der Software Geomail auf Eignung als Logistikplattform zur Visualisierung, Lenkung, Überwachung und Dokumentation bei Holzernte, Holzverkauf und Holzabfuhr. Interner Forschungsbericht / Fachinstitut für Arbeitsaudit, Tharandt. 2004. – Forschungsbericht (zitiert auf Seite 1)

FALKENRIED 2004

FALKENRIED, L.: Pilotphase zur Zustandserfassung der Gebiete Eifel und Winterberg-Grindfeld / Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten NRW. Version: 2004. http://www.loebf.nrw.de/Bilder_und_Dokumente/PDF_Dokumente/Fachbeitraege_Abteilung_4/abschlussbericht.pdf. 2004. – Forschungsbericht (zitiert auf den Seiten 12, 16, 18, 90 und 91)

FIRTH & BROWNLIE 1998

FIRTH, J. ; BROWNLIE, R.: An Efficiency Evaluation of the Global Positioning System under Forest Canopy. In: *NZ Forestry* 43 (1998), Nr. 5, S. 19–25 (zitiert auf den Seiten 16 und 88)

FRICKE 2004

FRICKE, W.: *Statistik in der Arbeitsorganisation*. Darmstadt : REFA Bundesverband e.V., 2004. – ISBN 3-446-22763-6 (zitiert auf Seite 44)

FRITZ & GAWEHN 2001

FRITZ, R. ; GAWEHN, P.: Vermessung von Waldmessstationen mit DGPS. In: *AFZ-Der Wald* 63 (2001), Nr. 10, S. 518–521 (zitiert auf Seite 12)

GABRIEL 2008

GABRIEL, O.: Rückegassen dokumentieren. In: *Forst und Technik* (2008), Nr. 9, S. 52–54 (zitiert auf Seite 11)

GANDASECA ET AL. 2001

GANDASECA, S. ; YOSHIMURA, T. ; HASEGAWA, H.: Evaluating the Positioning Performance of GPS

Surveying Under Different Forest Condition in Japan. In: *Precision Forestry - Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium*, 2001 (zitiert auf den Seiten 88 und 91)

GARMIN 2005

GARMIN: GPS 16/17 Series Technical Specifications / Garmin International, Inc. 2005. – Forschungsbericht (zitiert auf den Seiten 21, 29, 37 und 155)

GARMIN 2010

GARMIN: *What is EPE?* Zitiertes Brief. <http://gpsinformation.net/main/epenew.txt>. Version: 2010. – abgerufen am 12.06.2010 (zitiert auf Seite 7)

GEOSYSTEMS 1999

GEOSYSTEMS, Leica: *Introduction to GPS*. Leica Geosystems, 1999 (zitiert auf den Seiten 4 und 8)

GILLET ET AL. 2001

GILLET, J. ; SCHERZINGER, B. ; LITHOPOULOS, E.: Tightly Coupled Inertial/GPS System for Precision Forestry Surveys Under Canopy: Test Results. In: *Precision Forestry - Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium*, 2001 (zitiert auf Seite 2)

GIMPL 2002

GIMPL, M.: *Forstvermessung - HEUTE*, Technische Universität Dresden., Diplomarbeit, 2002 (zitiert auf den Seiten 12, 15, 18 und 91)

GREGORY 1996

GREGORY, T.: *Understanding the GPS - An Introduction to the Global Positioning System - What It Is and How It Works*. GeoResearch, Inc., 1996 (zitiert auf Seite 4)

GREIFENEDER 2005

GREIFENEDER, C.: *Abschattung von GPS-Satelliten - Sichtbarkeitsanalysen unter Verwendung eines digitalen Oberflächenmodells*, Paris Lodron-Universität Salzburg, Diplomarbeit, 2005 (zitiert auf den Seiten 4, 16, 18, 38 und 91)

GÖTTING 2004

GÖTTING, I.: *Vergleichende Untersuchung bei der Neuanlage von Rückegassen zwischen Konventionellen und satellitengestützten Verfahren*, Technische Universität Dresden, Professur für Forsttechnik, Diplomarbeit, 2004 (zitiert auf Seite 12)

HAMBERGER 1996

HAMBERGER, J.: Positive Erfahrungen aus dem Hochgebirge. GPS für die Vermessung von Rückewegen und Forststraßen. In: *Allgemeine Forstzeitung* (1996), Nr. 6, S. 303–304 (zitiert auf den Seiten 16 und 91)

HAMBERGER 1999

HAMBERGER, J.: Ist GPS geeignet um Befahrungen schwerer Holzerntemaschinen auf Rückegassen zu dokumentieren? In: *Forsttechnische Informationen* (1999), Nr. 5+6, S. 49–55 (zitiert auf den Seiten 14, 16, 17, 88 und 92)

HAMBERGER 2001

HAMBERGER, J.: *GPS als Mittel zum umweltschonenden Maschienneneinsatz: Navigation von Forstmaschinen und Dokumentation ihrer Fahrbewegungen*, Technische Universität München, Diss., 2001 (zitiert auf den Seiten 2, 8, 10, 12, 14, 15, 20 und 92)

HÜCKEL 2003

HÜCKEL, N.: *Navigation von Forstmaschinen und Dokumentation ihrer Fahrbewegungen mit Hilfe der*

Satellitenavigationssysteme NAVSTAR GPS und GLONAS, Technische Universität Dresden, Professur für Forsttechnik, Diplomarbeit, 2003 (zitiert auf Seite 8)

HÜCKEL 2007

HÜCKEL, N.: Global Navigation Satellite System / Technische Universität Dresden. 2007. – Forschungsbericht (zitiert auf den Seiten 2, 11, 12 und 13)

HELLSTRÖM ET AL. 2009

HELLSTRÖM, P. T. and L. T. and Lärkeryd ; NORDFJELL, T. ; RINGDAHL, O.: Autonomous forest vehicles - envisioned and state of the art. In: *Int. Journal of Forest Engineering* 20 (2009), S. 33–38 (zitiert auf Seite 2)

HOLDEN ET AL. 2001

HOLDEN, A. A. N. M. and Martin M. N. M. and Martin ; OWENDE, P.M. ; WARD, S.M.: A Method For Relating GPS Performance To Forest Canopy. In: *International Journal of Forest Engineering* 12 (2001), Nr. 2, S. 51–56 (zitiert auf den Seiten 15 und 91)

HOLDEN ET AL. 2002

HOLDEN, F.C. N. M. and D. N. M. and Delgado ; OWENDE, P.M. ; WARD, S.M.: Performance of a Differential GPS in Dynamic Mode Under Sitka Spruce Canopies. In: *International Journal of Forest Engineering* 13 (2002), Nr. 1, S. 33–40 (zitiert auf Seite 16)

HOLLEY 2001

HOLLEY, B.: RealTime Harvester: The Future of Logging. In: *Precision Forestry - Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium*, 2001 (zitiert auf Seite 2)

JACKE 1976

JACKE, H.: *Anwendbarkeit von vier Normalitätstests auf Stichproben verschiedener Umfänge*, Universität Göttingen, Diplomarbeit, 1976 (zitiert auf Seite 46)

JACKE 1980

JACKE, H.: *Zur Technik der Regressionsrechnung bei der Analyse forstlicher Arbeitszeitstudien*, Forstliche Fakultät, Universität Göttingen, Diss., 1980 (zitiert auf den Seiten 44 und 46)

JANSSEN & LAATZ 2005

JANSSEN, J. ; LAATZ, W.: *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows*. Bd. 5. Auflage. Springer Verlag Heidelberg Berlin, 2005 (zitiert auf Seite 44)

KAMMERMEIER 2007

KAMMERMEIER, M.: *Optimierung des Informations- und Datenflusses innerhalb der Holzerntekette mit Hilfe der RFID-Transpondertechnology*, Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Wald und Forstwirtschaft, Diplomarbeit, 2007 (zitiert auf Seite 1)

KAUL 2007

KAUL, C.: *Technische Anforderungen für einen Einsatz der RFID-Transpondertechnology*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2007 (zitiert auf Seite 1)

KENNEDY 1997

KENNEDY, M.: A Review of GPS Technology and its application for the forest Industry in 1997. In: *Logistics for the Forest Industry, Proceedings, LIRO Roturua, NZ*, 1997, S. 1–9 (zitiert auf den Seiten 16 und 92)

KETTEMANN 1995

KETTEMANN, R.: GPS und seine Anwendungsmöglichkeiten im Forstwesen. In: *AFZ-Der Wald* (1995), Nr. 22, S. 1201–1203 (zitiert auf den Seiten 20 und 92)

KÖHNE & WÖSSNER 2010

KÖHNE, A. ; WÖSSNER, M.: *Fehlerquellen bei GPS*. <http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen.htm>.
Version: 2010. – Abgerufen 14.02.2010 (zitiert auf den Seiten 9 und 20)

KOH & SARABANDI 2002A

KOH, I.-S. ; SARABANDI, K.: Performance characterization of GPS receivers under tree canopies. In: *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2000. IEEE, 2002* (zitiert auf den Seiten 10 und 92)

KOH & SARABANDI 2002B

KOH, Suek ; SARABANDI, K.: Polarimetric Channel Characterization of Foliage for Performance Assessment of GPS Receivers Under Tree Canopies. In: *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION* 50 (2002), Nr. 2, S. 713–726 (zitiert auf Seite 92)

KORTH & RESNIK 2005

KORTH, W. ; RESNIK, B.: Mobile Geodatenerfassung mit Handheld-GPS-Empfängern - Probleme und Lösungsansätze. In: *Chesi/Weinold (Hrsg) 13. Internationale Geodätische Woche Obergurgl*. Wichmann Verlag, 2005, S. 82–92 (zitiert auf den Seiten 17, 20, 89 und 92)

LANCE 1993

LANCE, K.: Bringing technology down to earth. A GPS consumer guide. In: *Journal of Forestry* 91 (1993), Nr. 8, S. 17–19 (zitiert auf Seite 16)

LEITGEB & GÄRTNER 2006

LEITGEB, E. ; GÄRTNER, U.: *Buchenvoranbau unter Fichte - Lichtverhältnisse und Erntemethoden*. http://www.waldwissen.net/themen/waldbau/waldumbau/bfw_buchenvoranbau_licht_2005_DE. Version: 2006. – abgerufen am 12.01.2010 (zitiert auf Seite 25)

LÜKE & HEELING 1996

LÜKE, P. ; HEELING, V.: GPS beim Testlauf zur landeswaldinventur in Nordrhein-Westfalen. In: *Der Vermessungs-Ingenieur* 47 (1996), Nr. 2, S. 79–91 (zitiert auf den Seiten 18, 20, 91 und 92)

LOOSE & ZANDER 2005

LOOSE, J. ; ZANDER, J.: Neue Wege der Flächenermittlung in der Forstwirtschaft. In: *LWF Aktuell* 50 (2005), S. 28–30 (zitiert auf Seite 1)

LUCAS 2007

LUCAS, K.: GPS Performance Under-the-Forest Canopy / Timber Stand Informations. 2007. – Forschungsbericht (zitiert auf Seite 91)

MARTIN ET AL. 2000

MARTIN, A. A. ; HOLDEN, N. M. ; OWENDE, P.M. ; WARD, S.M.: The Effects of Peripheral Canopy on DGPS Performance on Forest Roads. In: *International Journal of Forest Engineering* 12 (2000), Nr. 1, S. 71–79 (zitiert auf Seite 90)

McLACHLAN 2002

McLACHLAN, E.: Collecting Quality GPS Data in a Canopy Environment. In: *ESRI User Conference, 2002* (zitiert auf Seite 95)

MEHAFFEY 2010

MEHAFFEY, J.: *Error Measures*. <http://gpsinformation.net/main/errors.htm>. Version: 2010. – abgerufen am 12.06.2010 (zitiert auf Seite 7)

MILLIGAN 2003

MILLIGAN, M.: RTI-Real-Time Inventory a New Approach to an Old Problem. In: *Precision Forestry - Proceedings of the Second International Precision Forestry Symposium*, 2003 (zitiert auf Seite 2)

MOSKAL ET AL. 2009

MOSKAL, M. ; ERDODY, T. ; KATO, A. ; RICHARDSON, J. ; ZHENG, G. ; BRIGGS, D.: Lidar Applications in Precision Forestry. In: *Proceedings of Silvilaser 2009 the 9th international conference on lidar applications for assessing forest ecosystems*, 2009 (zitiert auf Seite 91)

MOSTAFA ET AL. 2001

MOSTAFA, M. ; HUTTON, J. ; REID, B. ; HILL, R.: GPS/IMU products - the Applanix approach. In: FRITSCH, D. (Hrsg.) ; SPILLER, R. (Hrsg.): *Photogrammetric Week 01*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2001 (zitiert auf Seite 96)

MURPHY ET AL. 2006

MURPHY, G. ; WILSON, I. ; BARR, B.: Developing methods for pre-harvest inventories with use a harvester as the sampling tool. In: *Australian Forestry* 69 (2006), Nr. 1, S. 9–15 (zitiert auf Seite 2)

NAESSET 1999

NAESSET, E.: Point accuracy of combined pseudorange and carrier phase differential GPS under forest canopy. In: *Canadian Journal of Forest Research* 29 (1999), Nr. 5, S. 547–553 (zitiert auf Seite 15)

NAUMANN ET AL. 2003

NAUMANN, S. ; KÜHNEL, J. ; NICKE, A.: Submetergenaue Positionierung im Wald mit Globalen Navigations-Satelliten-Systemen (GNSS). Untersuchung der Genauigkeit und Brauchbarkeit von terrestrischen Korrekturdatendiensten für die satellitengestützte Vermessung. In: *Forst und Holz* (2003), Nr. 18, S. 550–553 (zitiert auf den Seiten 2, 12, 15, 17 und 92)

OEFVERBERG 1995

OEFVERBERG, T.: Zur Genauigkeit des GPS für die Forstvermessung. In: *AFZ-Der Wald* 60 (1995), Nr. 22, S. 1207–1208 (zitiert auf den Seiten 20 und 92)

DE OLIVEIRA 2004

OLIVEIRA, V. C.: *Bestimmung und Optimierung der Leistungsfähigkeit des Transportnetzes zur Sicherung der Holzversorgung eines Zellstoffwerkes - untersucht am Beispiel eines Plantagenforstbetriebes in Südostbrasilien*, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Diss., 2004 (zitiert auf Seite 2)

PIRTI 2008

PIRTI, A.: Accuracy Analysis of GPS Positioning Near the Forest Environment. In: *Croatian Journal of forest engineering* 29 (2008), Nr. 2, S. 189–199 (zitiert auf Seite 16)

POLACZEK 1999

POLACZEK, K.: *Das Global Positioning System (GPS)-Neue Perspektiven für das forstliche Arbeitszeitstudium?*, Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Diplomarbeit, 1999 (zitiert auf den Seiten 2 und 8)

PURFÜRST 2002

PURFÜRST, F. T.: *Darstellung von Harvestersortimentsdaten auf digitalen Karten*. Bachelor-Arbeit, Fachrichtung Forstwissenschaften, TU-Dresden, 2002 (zitiert auf den Seiten 1, 8 und 15)

PURFÜRST & ERLER 2007

PURFÜRST, F. T. ; ERLER, J.: *Technologieentwicklung zur Bewegungsdokumentation und Navigation von mobilen Arbeitsmaschinen*. 2007. – Fachinstitut für Waldarbeit e.V., Projekt-Abschlussbericht, unveröffentlicht (zitiert auf den Seiten 2 und 12)

PURFÜRST ET AL. 2007

PURFÜRST, F.T. ; ERLER, J. ; GRÜGER, H. ; HEBERER, A. ; SCHMIDT, A. ; WEHNER, T.: Hochgenaue Positionsbestimmung von Forstmaschinen,. In: *Forst & Technik* 19 (2007), Nr. 12 (zitiert auf den Seiten 1, 2, 11, 12, 89 und 96)

PURFÜRST ET AL. 2010

PURFÜRST, T. ; BÖHME, I. ; FLECHSIG, B. ; ESSBACH, T. ; SCHREIBER, J. ; ERLER, J.: Genauigkeit einer GNSS-Gassenvermessung per Harvester. In: *in Druck* (2010). – In Druck (zitiert auf den Seiten 2 und 14)

RESNIK 2002

RESNIK, B.: Praktische Untersuchungen zur Genauigkeit von Flächenermittlungen mit Handheld-GPS-Empfängern. In: *AVN - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 10 (2002), S. 346–351 (zitiert auf Seite 12)

REUTEBUCH ET AL. 2001

REUTEBUCH, S. ; CARSON, W. ; AHMED, K.: A Test of the Applianix POS LS Inertial Positioning System for the Collection of Terrestrial Coordinates under a Heavy Forest Canopy. In: *Proceedings from the First International Precision Forestry Symposium*, 2001 (zitiert auf Seite 96)

RINGDAHL & HELLSTRÖM 2008

RINGDAHL, O. ; HELLSTRÖM, T.: *Autonomous Forest Machines - Techniques and Algorithms for Unmanned Vehicles*. VDM Verlag Dr. Müller, 2008. – 148 S. – ISBN 978-3-639-04343-3 (zitiert auf Seite 2)

RODRIGUEZ-PEREZ ET AL. 2006

RODRIGUEZ-PEREZ, J. ; ALVAREZ, M. ; SANZ, E. ; GAVELA, A.: Comparison of GPS Receiver Accuracy and Precision in Forest Environments. Practical Recommendations Regarding Methods and Receiver Selection. In: *GNSS Processing and Applications, XXIII FIG Congress*, 2006 (zitiert auf Seite 15)

ROSSMANN ET AL. 2009

ROSSMANN, J. ; SCHLUSE, M. ; SCHLETTE, C. ; BUECKEN, A. ; KRAHWINKLER, P. ; EMDE, M.: Realization of a highly accurate mobile robot system for multi purpose precision forestry applications. In: *Advanced Robotics, 2009. ICAR 2009.*, 2009 (zitiert auf Seite 2)

SACHS 2004

SACHS, L.: *Angewandte Statistik*. Bd. 11. Springer Verlag Heidelberg Berlin, 2004 (zitiert auf Seite 44)

SAKAI ET AL. 2006

SAKAI, T. ; NOSE, M. ; YOSHIMURA, T.: High-end GPS vs. Low-end GPS: Comparing GPS positional accuracy in the forest environment. In: *Precision Forestry in plantations, semi-natural and natural forests. Proceedings of the International Precision Forestry Symposium, Stellenbosch University, South Africa, March 2006*, 2006 (zitiert auf den Seiten 10, 12 und 88)

SCHMIDT-BAUM 2008

SCHMIDT-BAUM, T.: *Konzepte für Rettungsketten in Waldarbeitssystemen*, Universität Göttingen, Diss., 2008 (zitiert auf Seite 1)

SCHREIBER 2009

SCHREIBER, J.: Dokumentation von Fahrlinien / Rückegassen mit GPS im Wald / Staatsbetrieb Sachsenforst. 2009. – Forschungsbericht (zitiert auf Seite 1)

SCHWALBE ET AL. 2006

SCHWALBE, E. ; MAAS, H.-G. ; ROSCHER, M. ; WAGNER, S.: Profile based sub-pixel-classification of hemispherical images for solar radiation analysis in forest ecosystems. In: *Remote Sensing: From Pixels*

to Processes. *Proceedings of ISPRS Commission VII Symposium. Enschede (The Netherlands)*, 2006 (zitiert auf den Seiten 35, 71 und 91)

SCHWITZGEBEL ET AL. 2009

SCHWITZGEBEL, F. ; DUNGER, K. ; POLLAY, H.: Eine Kohlenstoffinventur auf Bundeswaldinventur-Basis - Hintergrund, Methodik und Durchführung der Studie. In: *AFZ-Der Wald* 64 (2009), Nr. 20, S. 1070–1071 (zitiert auf Seite 1)

SIGRIST ET AL. 1999

SIGRIST, P. ; COPPIN, P. ; HERMY, M.: Impact of forest canopy on quality and accuracy of GPS measurements. In: *International Journal of Remote Sensing* 18 (1999), S. 3595–3610 (zitiert auf den Seiten 15, 16, 17, 18 und 91)

TACHIKI ET AL. 2005

TACHIKI, Y. ; YOSHIMURA, T. ; HASEGAWA, H. ; MITA, T. ; SAKAI, T. ; NAKAMURA, F.: Effects of polyline simplification of dynamic GPS data under forest canopy on area and perimeter estimations. In: *Journal of Forest Research* 10 (2005), S. 419–437 (zitiert auf Seite 14)

TAYLOR ET AL. 2001

TAYLOR, S. ; McDONALD, T. ; VEAL, M. ; GRIFT, T.: Using GPS to Evaluate Productivity and Performance of Forest Machine Systems. In: *Precision Forestry - Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium*, 2001 (zitiert auf den Seiten 1 und 2)

TOPCON 2003

TOPCON: GPS Receiver Interface Language (GRIL) / Topcon Positioning Systems, Inc. Topcon Positioning Systems, Inc, 2003. – Forschungsbericht (zitiert auf Seite 117)

TOPCON 2004

TOPCON: Legacy-E/H data sheet / Topcon Europe B. V. Version: 2004. http://www.topcon-positioning.eu/de/img/pdf/pdf_GPS/LegacyEH_English_final_web.pdf. 2004. – Forschungsbericht. – abgerufen am 20.03.2010 (zitiert auf Seite 156)

TUCEK & LIGOS 2002

TUCEK, J. ; LIGOS, J.: Forest canopy influence on the precision of location with GPS receivers. In: *Journal of Forest Science* 9 (2002), S. 399–407 (zitiert auf Seite 92)

VENABLES & RIPLAY 2003

VENABLES, W.N. ; RIPLAY, B.D.: *Modern Applied Statistics with S*. Springer Verlag Heidelberg Berlin, 2003 (zitiert auf Seite 44)

WANNINGER ET AL. 2000

WANNINGER, L. ; FREVERT, V. ; WILDT, S.: Der Einfluß der Signalbeugung auf die präzise Positionierung mit GPS. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 125 (2000), S. 8–16 (zitiert auf Seite 19)

WEISS 2006

WEISS, R.: Grundlagen der GPS-Höhenmessungen. In: *Höhenmessungen mit GPS - Status quo und Entwicklungstendenzen, Kolloquium Koblenz*, 2006 (zitiert auf Seite 18)

WELTZIEN 2003

WELTZIEN, C.: GPS-Empfänger Vergleich - Genauigkeit der statischen und dynamischen Positionierung / Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. 2003. – Forschungsbericht (zitiert auf Seite 14)

WORMLEY 2010

WORMLEY, S.: *GPS Errors & Estimating Your Receiver's Accuracy*. http://edu-observatory.org/gps/gps_accuracy.html. Version: 2010. – abgerufen am 12.06.2010 (zitiert auf Seite 7)

ZIMMERMANN 1997

ZIMMERMANN, T.: *GPS im Forstbereich - Stand der derzeitigen Untersuchungen*, Ludwig-Maximilians-Universität München, Diplomarbeit, 1997 (zitiert auf Seite 8)

Glossar

Von verschiedenen Autoren und in verschiedenen Medien werden unterschiedliche Begriffsbestimmungen benutzt. Für das Verständnis ist es wichtig, genau zu wissen wie ein Begriff definiert ist. Um den gemeinsamen Nenner herzustellen, sollen hier die wichtigsten, in dieser Arbeit verwendeten Begriffe mit ihrer Quelle aufgeführt werden. Gleichzeitig soll das Verzeichnis als Abkürzungsverzeichnis dienen.

Accuracy	Siehe Richtigkeit §116 .
Ah	Ah steht für die Einheit der elektrischen Ladung: Amperestunden.
ASCII	Der ASCII-Code (American Standard Code for Information Interchange) beschreibt eine 7-Bit Zeichenkodierung, welche häufig die Grundlage für Textdateien bildet.
ASCOS	Bidirektionaler Satelliten-Referenzdienst für GPS- §114 und GLONASS-Positionierungen §113 , vergleichbar mit SAPOS §116 .
BEACON	BEACON wird ein Küstenfunkkorrektursignal bezeichnet, welches Referenzstationen für die Binnenschifffahrt in ganz Deutschland installiert.
Blattflächenindex	Der Blattflächenindex (BFI) gibt die Blattfläche im Verhältnis zur überschirmten Bodenfläche an.
Bug	Ein Bug ist ein Programmier-Fehler.
COM	Die „COM-Schnittstelle“ beschreibt die Serielle Schnittstelle RS-232 §116 .
CSV-Datei	CSV („Character-Separated Value“) beschreibt ein Dateiformat zur Speicherung von Textdateien, welches durch ein spezifisches Zeichen (Character) getrennt wird. Meist handelt es sich bei dem Trennzeichen um das „,“ (Komma). Daher wird CSV auch meist als „Comma-Separated Value“ bezeichnet.
dB	Dezibel - Ein Zehntel eines logarithmisch bewerteten Pegels.

DGNSS	DGNSS beschreibt das verallgemeinerte Differential Global Satellite System, welches verdeutlicht, dass das GNSS-Signal korrigiert wurde.
DGPS	DGPS beschreibt das Differential Global Positioning System, welches verdeutlicht, dass das GPS-Signal korrigiert wurde und bildet einen Spezialfall zum DGNSS ↗113 .
EGNOS	„European Geostationary Navigation Overlay Service“ (EGNOS): satellitengestütztes monodirektionales Referenz- und Überwachungssystem. Es ist voll kompatibel zu den Systemen WAAS (amerikanisch) und MSAS (japanisch).
EPE	Der Estimated Position Error (EPE) ist der geschätzte Positionsfehler und beschreibt den Radius des 68%-igen Vertrauensbereichs. Er kann über $EPE = HDOP * URA$ berechnet werden.
GALILEO	GALILEO bezeichnet das zukünftige europäische Globale Positionssystem. Es ergänzt GPS NAVSTAR ↗114 und GLO-NASS ↗113 .
Gauß-Krüger Koordinaten	Das Gauß-Krüger-Koordinatensystem ist ein kartesisches Koordinatensystem, welches es ermöglicht, Ausschnitte der Erde mit metrischen Koordinaten konform zu verorten.
GB	GB steht für GigaByte. Dies entspricht 2^{30} Byte = 1.073.741.824 Byte.
GDOP	Der GDOP (Geometric Dilution of Precision) beschreibt die Verringerung der Genauigkeit aufgrund der horizontalen, vertikalen und zeitlichen Satellitengeometrie (3D+Zeit) der zur Positionsbildung verwendeten Satelliten.
Genauigkeit	Genauigkeit ist ein Maß für die Übereinstimmung des einzelnen Messergebnisses mit der wahren Position. Sie setzt sich aus der Richtigkeit ↗116 und aus der Präzision ↗116 zusammen.
GLONASS	„Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema“: russisches Globales Navigations-Satelliten-System. Es erfüllt die selben Funktion wie das amerikanische GPS NAVSTAR ↗114 .
GNSS	„Global Navigation Satellite System“ – Zusammenfassung aller Satelliten- und Pseudosatellitensysteme zur Positionsbestimmung.

GPS	„Global Position System“: Als GPS wird meist das Satelliten-navigationsystem im Allgemeinen bezeichnet (GNSS ☞113). Im engeren Sinne ist damit GPS NAVSTAR das amerikani-sche Satellitennavigationssystem gemeint.
HDOP	Der HDOP (Horizontal Dilution of Precision) beschreibt die Verringerung der Genauigkeit aufgrund der horizontalen und vertikalen Satellitengeometrie (3D) der zur Positionsbildung verwendeten Satelliten.
Helmert-Transformation	Die Helmert-Transformation, auch als 7-Parameter-Transformation bezeichnet, beschreibt eine Koordinaten-transformation für dreidimensionale kartesische Koordinaten.
HVS	HVS steht für High Voltage System. Der Garmin GPS-Empfänger (HVS) kann mit einer Eingangsspannung zwischen 8-40 V betrieben werden.
HPE	Geschätzter horizontaler Positionsfehler.
Hz	Die Einheit der Frequenz, in pro Sekunde.
IMU-Box	„Inertial Measurement Unit“: beschreibt eine „Box“, welche Elektronik und Sensorik (meist Inertialsensorik ☞114) ent-hält. In dieser Arbeit ist damit eine Kombination aus spezi-ellen Beschleunigungssensoren, Gyroskopen und Magnetfeld-sensoren gemeint.
Inertialsensorik	Sensorik, die anhand der Trägheitseigenschaft von Körpern eine Änderung des Bewegungsvektors (Richtung, Geschwin-digkeit) misst.
Kinematische Messungen	Im Gegensatz zu den statischen GNSS-Messungen ☞117 ba-sieren die kinematischen GNSS-Messungen auf der Messung eines sich bewegenden GNSS-Empfänger, der linienhaft über eine definierte Zeit x die Position ermittelt.
L1-Frequenz	Das L1-Frequenz bezeichnet das Frequenzband von 1575,42 MHz, auf dem der C/A-Code und der P/Y-Code des Satelli-tensystems GPS NAVSTAR ☞114 gesendet wird.
LIDAR	LIDAR steht für Light detection and ranging.
LPR-System	„Local Positioning Radar-System“ (LPR): ein lokales Positio-nierungssystem zur Positionsbestimmung auf Grundlage von Radar.

LVS	LVS steht für Low Voltage System. Der Garmin GPS-Empfänger (LVS) kann mit einer Eingangsspannung zwischen 3,3-6 V betrieben werden.
Magnetfeldsensoren	Magnetfeldsensoren messen die magnetische Feldstärke in einer Dimension auf Grundlage von Wirkungen des magnetischen Feldes auf hart- oder weichmagnetische Werkstoffe.
MB	MB steht für MegaByte. Dies entspricht 2^{20} Byte = 1.048.576 Byte.
MEZ	MEZ beschreibt die Mitteleuropäische Zeit. Ihre Differenz zur Weltzeit UTC ☞117 beträgt +1 Stunde.
MDE	Mobile Datenerfassungseinheit – Bezeichnet ein Konzept, abseits eines stationären PC-Arbeitsplatzes, elektronische Daten zu erfassen.
Multipath-Effekt	Der Multi-Path-Effekt oder auch Mehrwegeeffekt beschreibt die Reflektion von Satellitensignalen an z. B. Blättern oder Nadeln. Das Signal legt somit einen längeren Weg zum Empfänger zurück. Dies führt zu Ungenauigkeiten in der Positionsbestimmung.
Nordloch	Das Nordloch beschreibt den Satellitenfreien Bereich auf der Nordhemisphäre.
NMEA	Bezeichnet den Standard NMEA 0183 der National Marine Electronics Association und beschreibt den Datenaustausch zwischen Navigationsgeräten.
OEM	Original Equipment Manufacture.
Parser	Ein Parser ist ein Programm, welches Daten nach einem bestimmten Muster durchsucht und in die einzelnen Bestandteile (Variablen) zerlegt.
PDA	Ein „Personal Digital Assistent“ (PDA) ist ein Minicomputer mit Display. Er zählt zu den MDE-Geräten ☞115 .
PDOP	Der PDOP (Positional Dilution of Precision) beschreibt die Verringerung der Genauigkeit aufgrund der horizontalen Satellitengeometrie (2D) der zur Positionsbildung verwendeten Satelliten.
Postprocessing	Postprocessing beschreibt im Allgemeinen die zeitlich versetzte Nachbearbeitung und Aufbereitung von Daten. Es steht im Gegensatz zur realtime-Analyse.

Präzision	Die Präzision beschreibt die Streuung der Werte um einen Mittelpunkt.
Precision	Siehe Präzision ↗116 .
Q-Q-Plot	Quantil-Quantil-Plot.
RD83/5	Amtliches geografisches Referenzsystem in Sachsen im 5. Meridianstreifen (DE RD/83 / GK 3). Entspricht dem EPSG:3399 (RD/83 / 3-degree Gauss-Kruger zone 5).
Richtigkeit	Die Richtigkeit beschreibt die Übereinstimmung des Mittelwertes der gemessenen Werte mit der tatsächlichen Position.
RJ45	RJ45 steht für „Registered Jack“ und stellt einen genormte Buchse bzw. Stecker dar. Die Version 45 steht dabei für eine Datenleitung, mit einem elektrischem Widerstand zur Codierung.
RS232	Der Begriff RS-232 bezeichnet einen Standard für eine serielle Schnittstelle. Ein neuerer Begriff für den Standard ist: ANSI/EIA/TIA-232-F-1997 .
RTCM	Beschreibt den Standard RTCM SC-104 (Radio Technical Commission for Maritime Services) zur Übertragung von Korrekturdaten für GNSS-Anwendungen.
SAPOS	Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung ist ein bidirektionaler Korrekturdienst der Bundesländer.
Signal-Laufzeit	Als Signal-Laufzeit wird die Zeitdauer bezeichnet, die das Satellitensignal vom Sendeort (Satellit) zum Empfängerort (GNSS-Gerät) benötigt. Auf den Unterschieden der Signallaufzeiten basieren die Positionsmessungen der GNSS-Empfänger ↗113 .
Signal-Rausch-Verhältnis	Das Signal-Rausch-Verhältnis gibt den Signalinhalt relativ zum Rauschen des Signals in dB an. Je höher das Signal-Rausch-Verhältnis umso stärker ist das Signal des Satelliten.
SIRF Star II & III	SIRF Star II & III sind die momentan verbreitetsten Chipsätze für „lowcost“ GPS-Empfänger und wurden zur Navigation in Fahrzeugen entwickelt.

SNR	SNR (Signal to Noise Ratio) - siehe Signal-Rausch-Verhältnis 116 .
Statische Messungen	Im Gegensatz zu den kinematischen GNSS-Messungen 114 basieren die statischen GNSS-Messungen auf einen Punkt stationierten Empfänger, der über eine definierte Zeit x die Position ermittelt.
Tamiya	Der Mini-Tamiya-Stecker ist eine definierte Steckverbindung, welche häufig im Modellsportbereich zum Anschluss der Spannungsversorgung verwendet wird.
TDOP	Der TDOP (Time Dilution of Precision) beschreibt die Verringerung der Genauigkeit aufgrund der zeitlichen Ungenauigkeit Satellitengeometrie der zur Positionsbildung verwendeten Satelliten.
TPS	Topcon Positions System Protokoll (TPS) ist ein Herstellerspezifisches GNSS-Protokoll (TOPCON 2003).
Trueness	Siehe Genauigkeit 113 .
Überschirmungsgrad	Der Überschirmungsgrad ergibt sich aus dem Quotient von überschirmter Fläche zur Gesamtfläche.
URA	URA steht für „User Range Accuracy“ und beschreibt quantitativ die vorhergesagte statistische Genauigkeit.
US-Anemometer	Ein Ultraschallanemometer ist ein Windmessgerät(-prinzip), welches den Wind mit sehr hoher Frequenz in drei Dimensionen erfassen kann.
UTC	UTC („Universal Time Coordinated“) beschreibt die koordinierte Weltzeit, welche als gültige Weltzeit von den verwendeten GNSS-Empfängern über das NMEA-Format 115 ausgegeben wird.
V	V steht für die Einheit der elektrischen Spannung: Volt.
VDOP	Der VDOP (Vertical Dilution of Precision) beschreibt die Verringerung der Genauigkeit aufgrund der vertikalen Satellitengeometrie (2D) der zur Positionsbildung verwendeten Satelliten.
VPE	Geschätzter vertikaler Positionsfehler.

WGS84

Das „World Geodetic System 1984“ (WGS 84) beschreibt ein geodätisches Referenzsystem, welche zur Positionsangabe auf der Erde verwendet wird. Es bildet den Standard für GNSS-Empfänger-Positionen.

XML

XML bezeichnet die „Extensible Markup Language“, eine Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdaten.

A Versuchsflächen

Versuchsflächen im Tharandter Wald

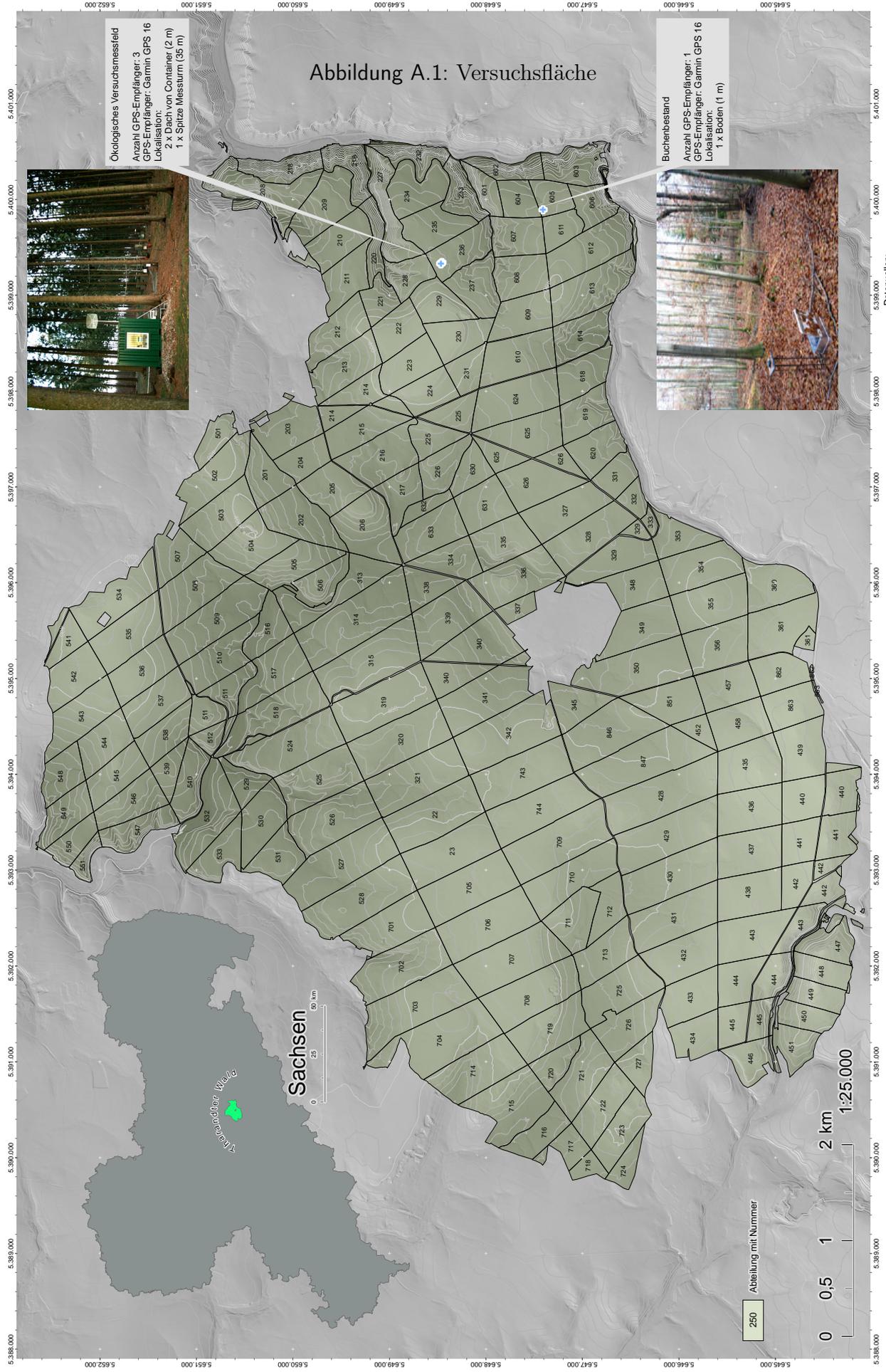


Abbildung A.1: Versuchsfläche

Ökologisches Versuchsmessfeld
 Anzahl GPS-Empfänger: 3
 GPS-Empfänger: Garmin GPS 16
 Lokalisation:
 2 x Dach von Container (2 m)
 1 x Spitze Messsturm (35 m)

Buchenbestand
 Anzahl GPS-Empfänger: 1
 GPS-Empfänger: Garmin GPS 16
 Lokalisation:
 1 x Boden (1 m)

250 Abteilung mit Nummer

0 0,5 1 2 km 1:25.000

Überschirmung Ökologisches Versuchsmessfeld



Abbildung A.2: Überschirmung über GPS-Empfänger „Dach 1“, „Dach 2“ (links) und Turm (rechts)

Überschirmung Buchenbestand



Abbildung A.3: Zustand der Buchen-Krone über GPS-Empfänger am 08.10.2009 (links) und am 16.10.2009 (rechts)



Abbildung A.4: Zustand der Buchen-Krone über GPS-Empfänger am 22.10.2009 (links) und am 26.10.2009 (rechts)

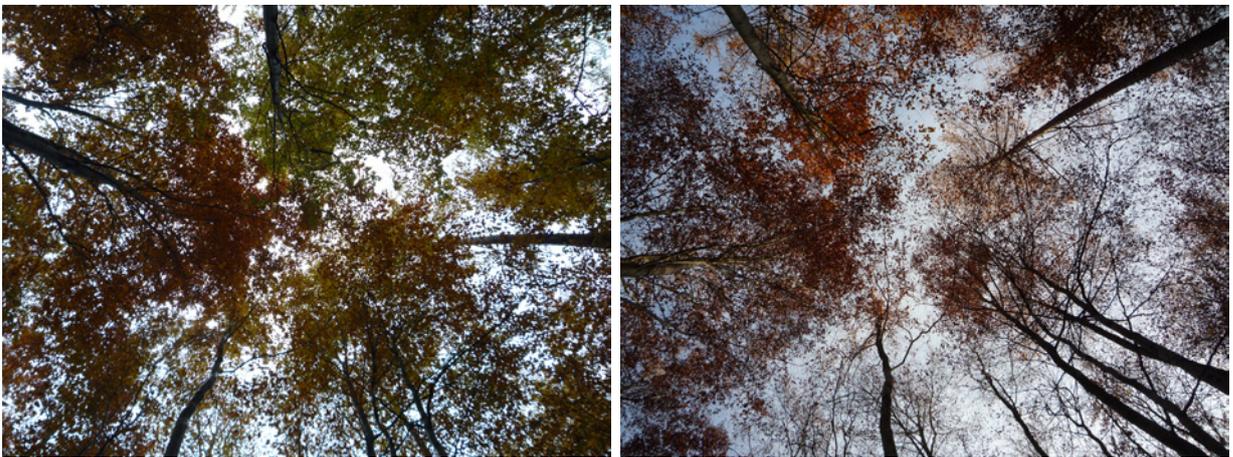


Abbildung A.5: Zustand der Buchen-Krone über GPS-Empfänger am 03.11.2009 (links) und am 13.11.2009 (rechts)



Abbildung A.6: Zustand der Buchen-Krone über GPS-Empfänger am 13.11.2009 (links) und am 21.12.2009 (rechts)

B Externe Faktoren

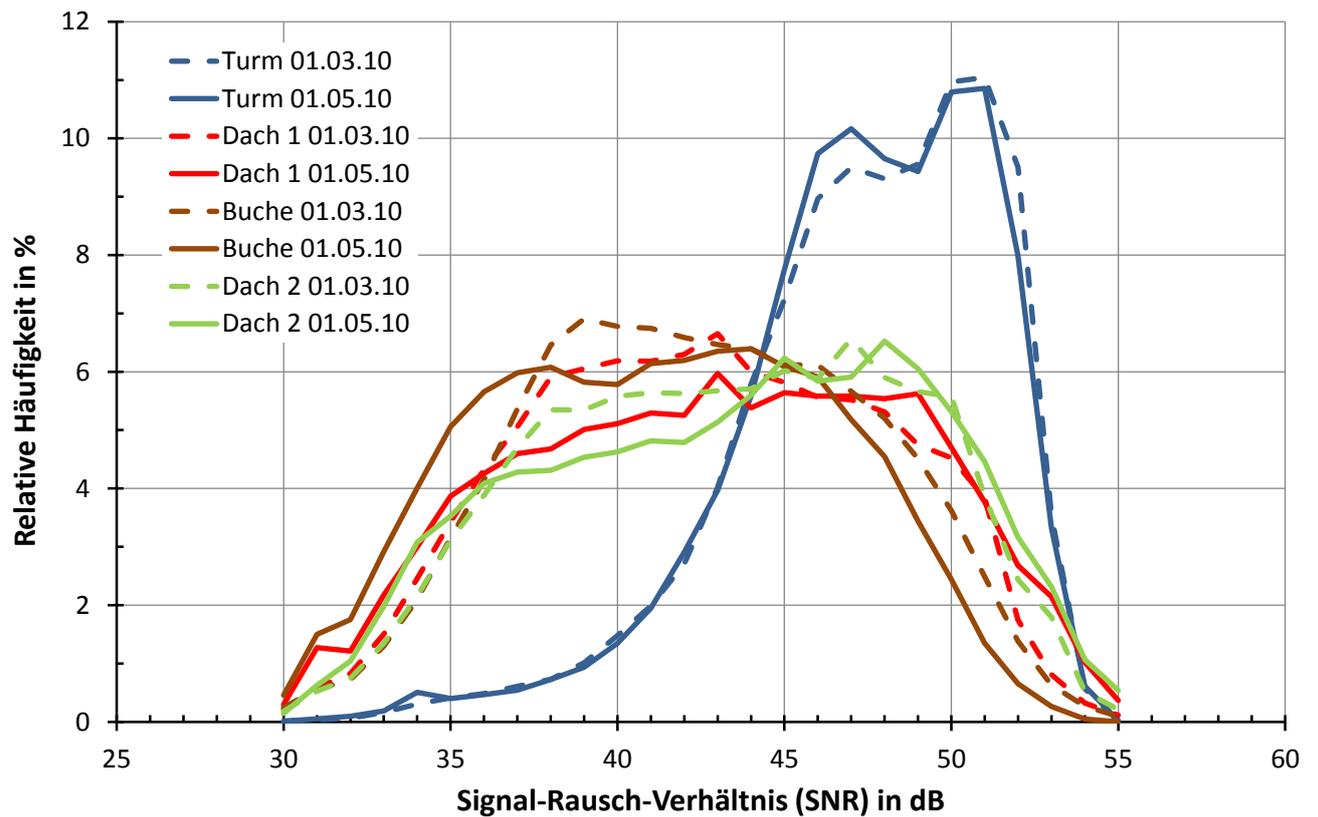


Abbildung B.1: Signal-Rausch-Verhältnis der Gesamtdaten der vier Empfänger zu unterschiedlichen Zeitpunkten

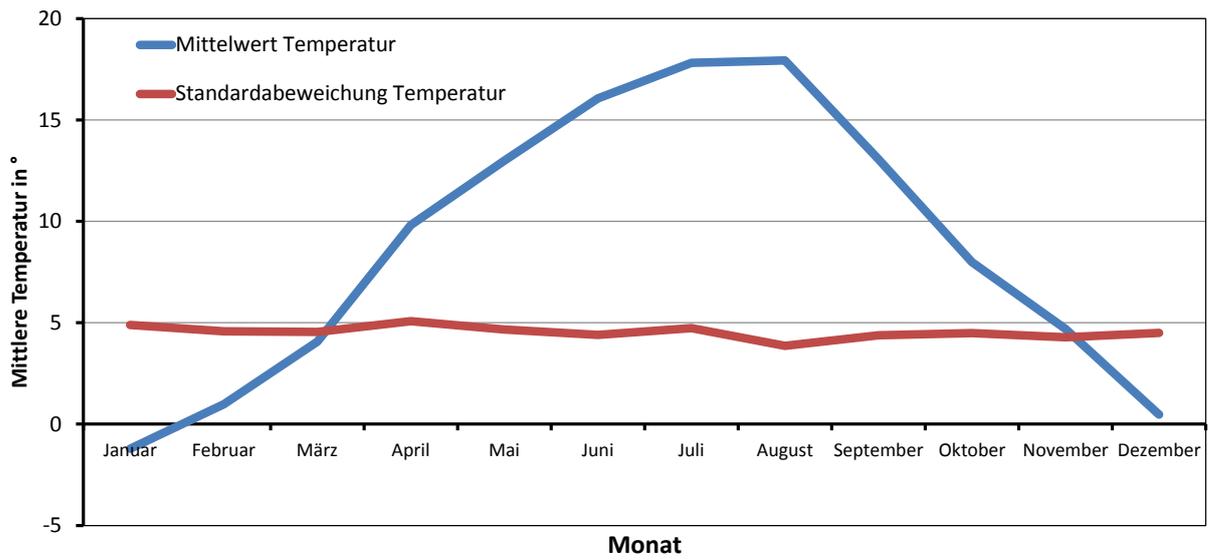


Abbildung B.2: Variation der monatlichen Temperatur

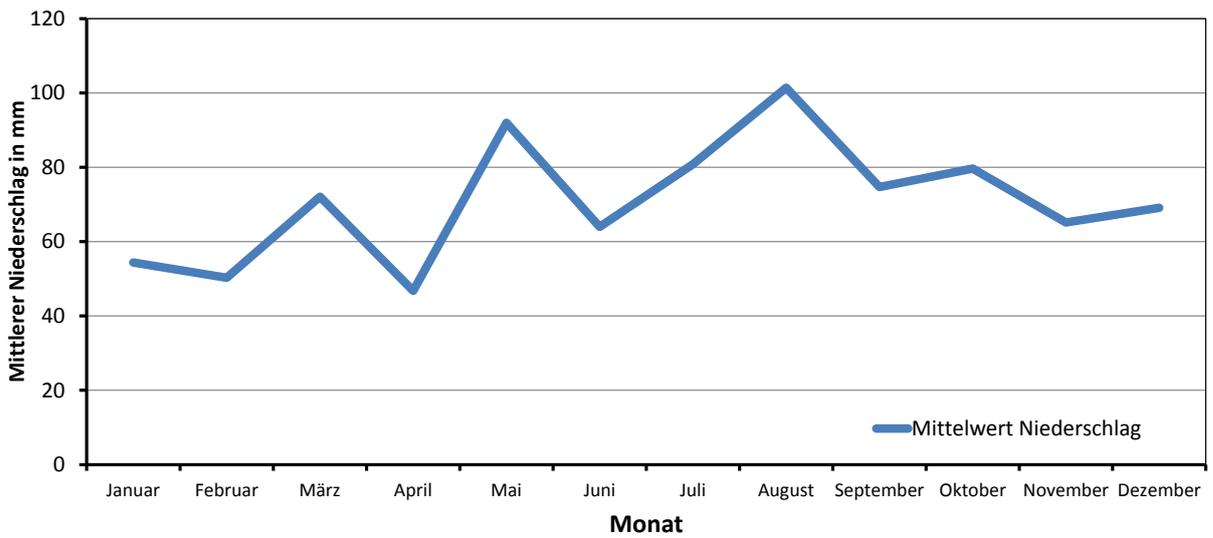


Abbildung B.3: Variation des monatlichen Niederschlages

B. Externe Faktoren

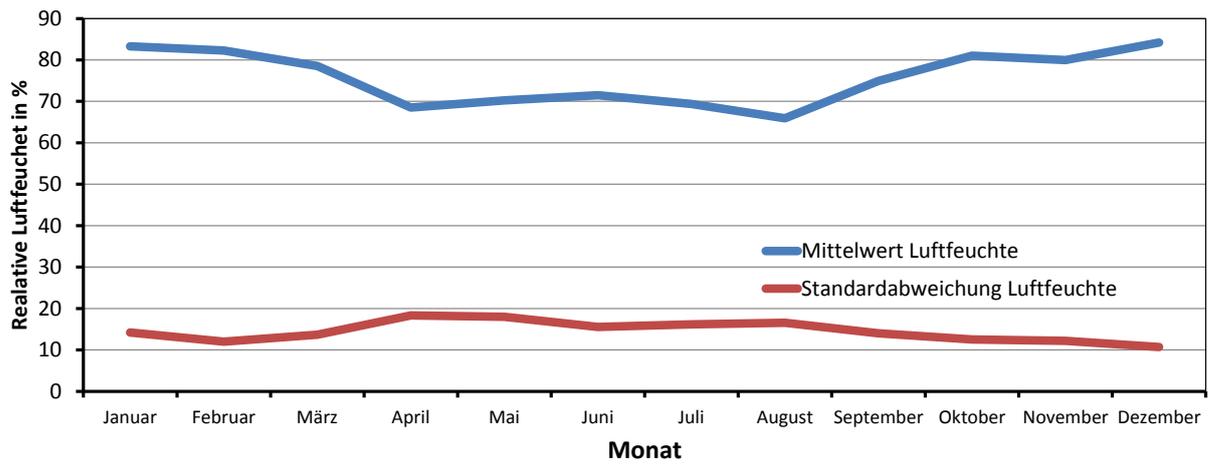


Abbildung B.4: Variation des monatlichen Luftfeuchtigkeit

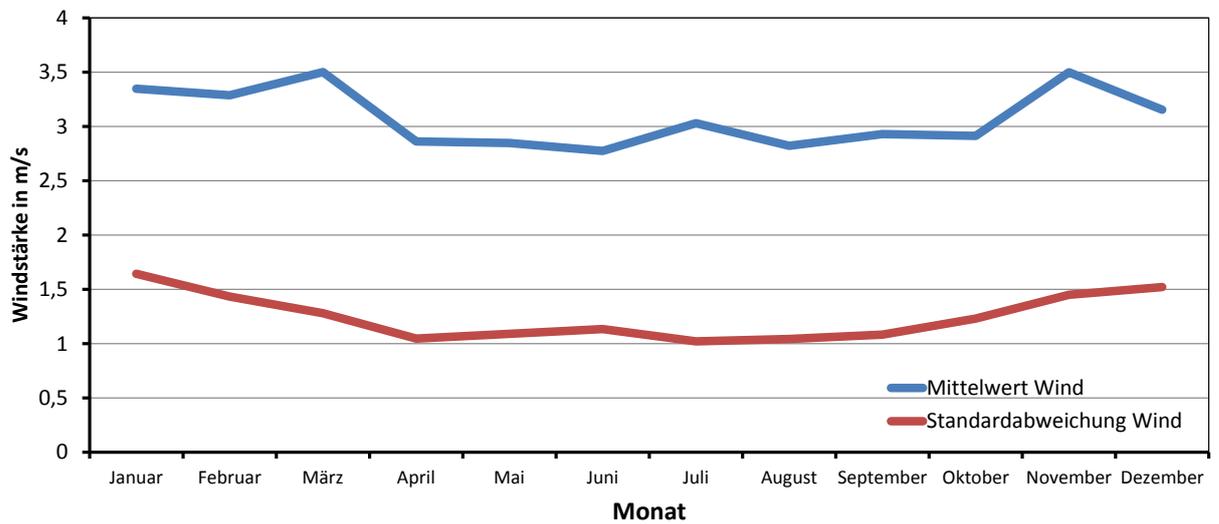


Abbildung B.5: Variation der monatlichen mittleren Windstärke

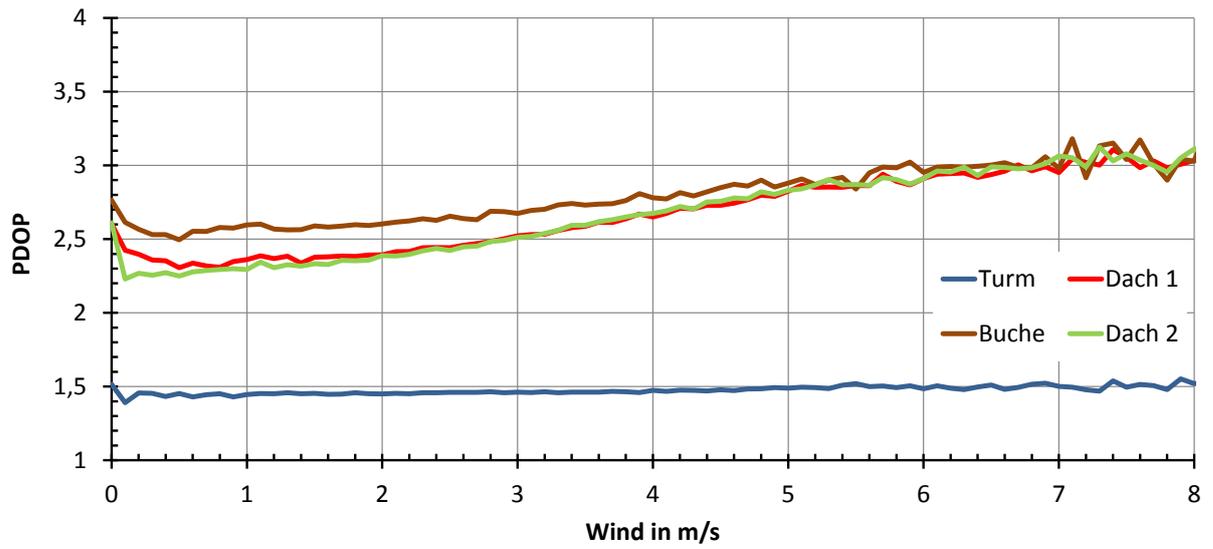


Abbildung B.6: Einfluss des Windes auf den PDOP

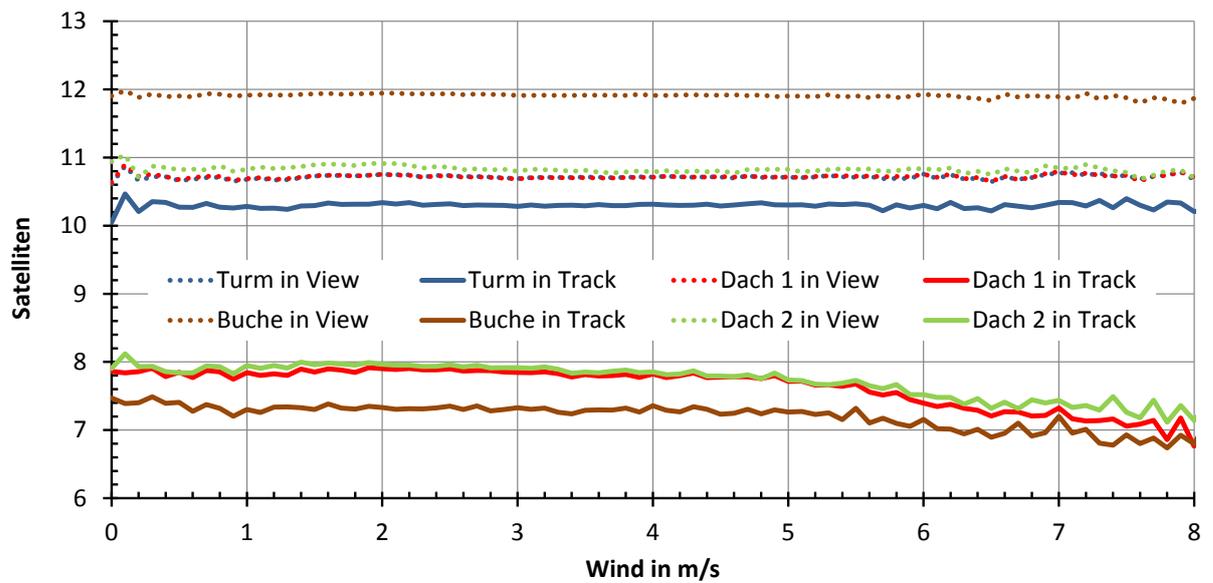


Abbildung B.7: Einfluss des Windes auf die Satelliten „in view“ bzw. „in track“

C Positionsdaten

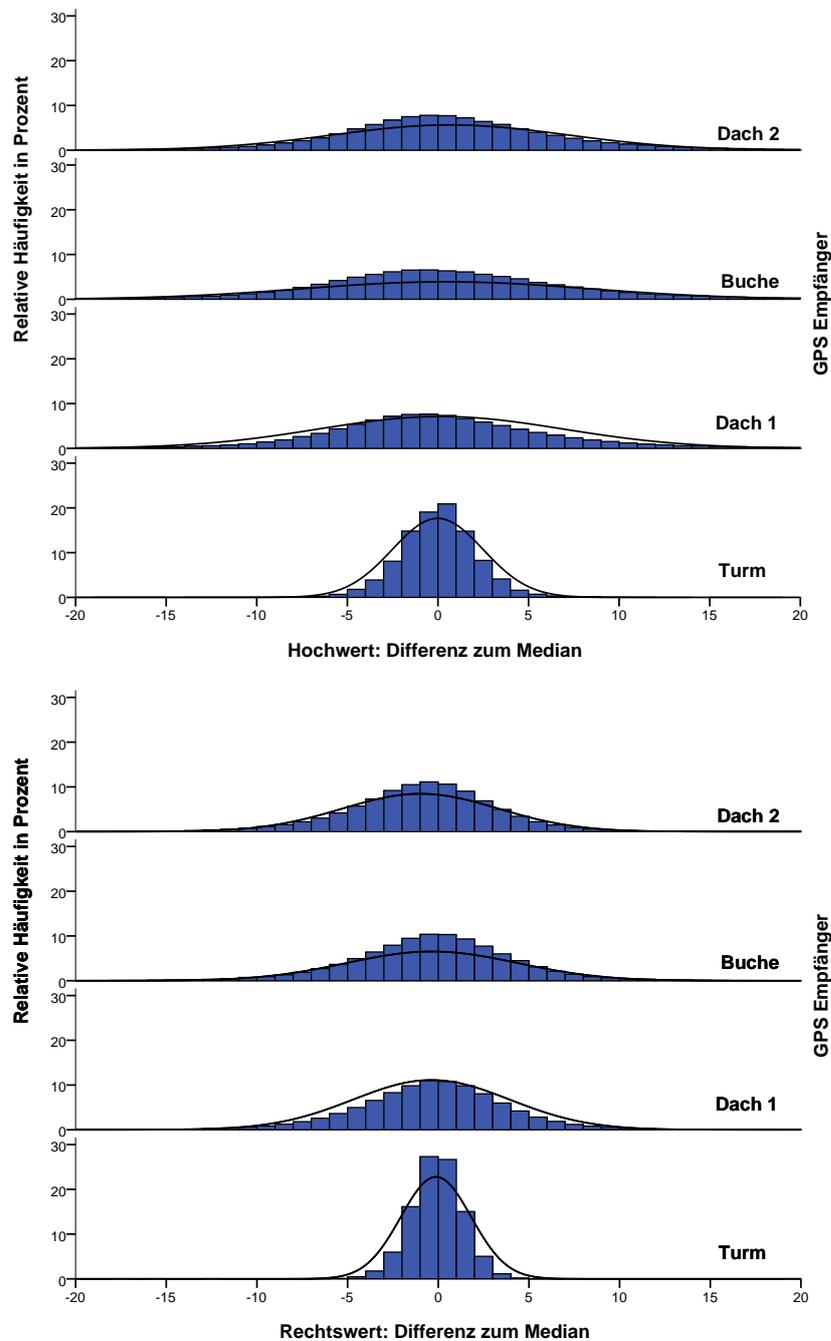


Abbildung C.1: Histogramm von Hoch- und Rechtwertes der verschiedenen GNSS-Empfänger

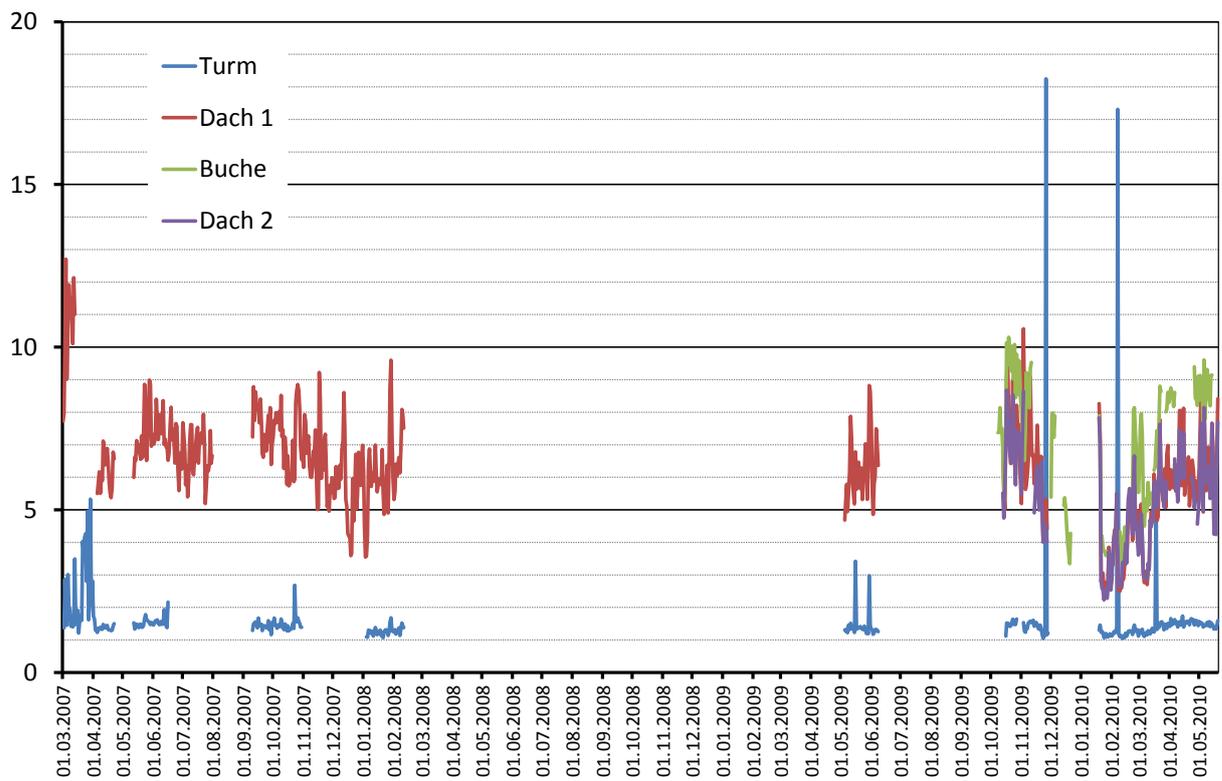


Abbildung C.2: Standardabweichung GNSS-Empfänger im Verlauf der Zeit geklustert nach Tagen

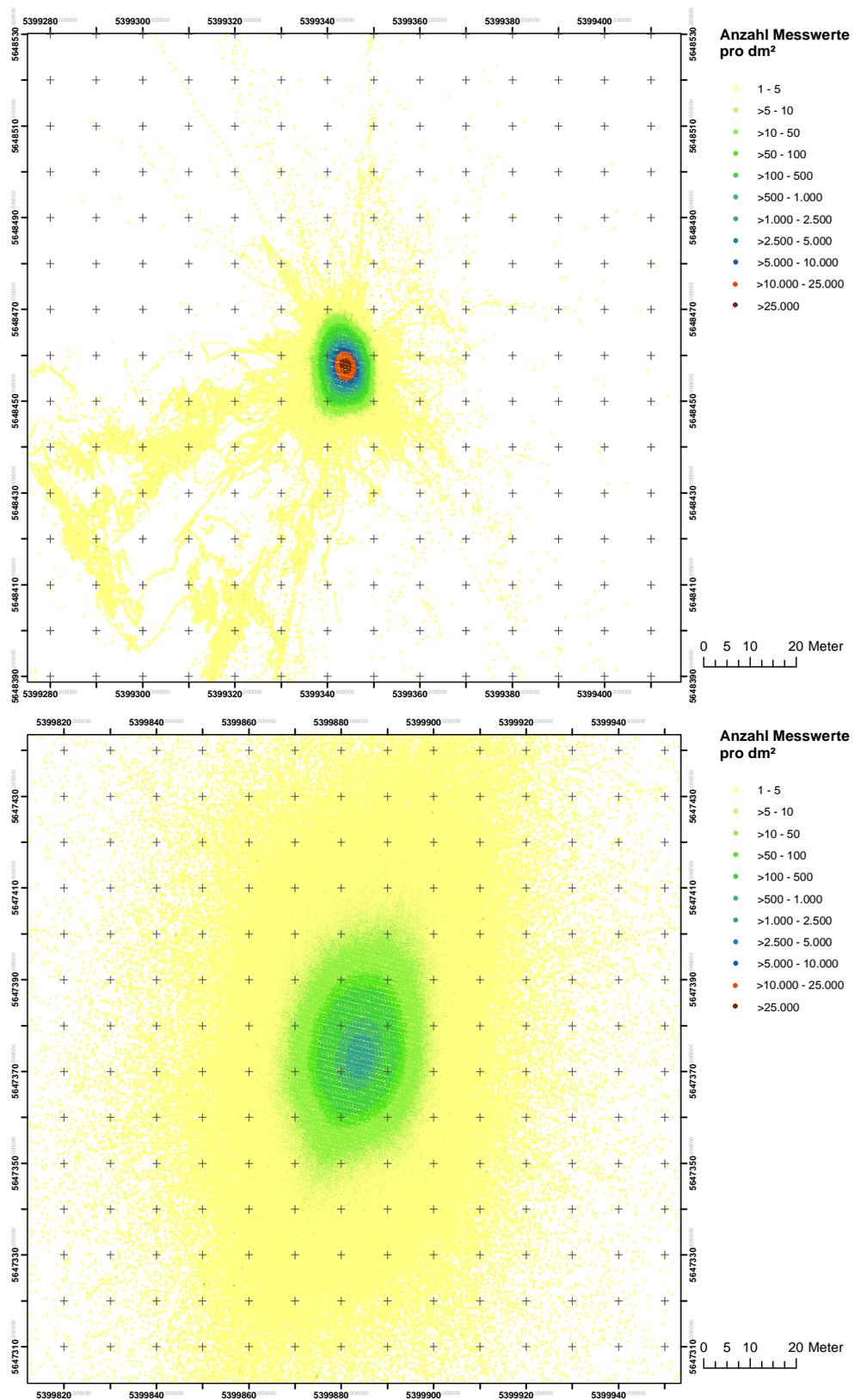


Abbildung C.3: Positionsdaten der GNSS-Empfänger
(oben: Turm, unten: Buche)

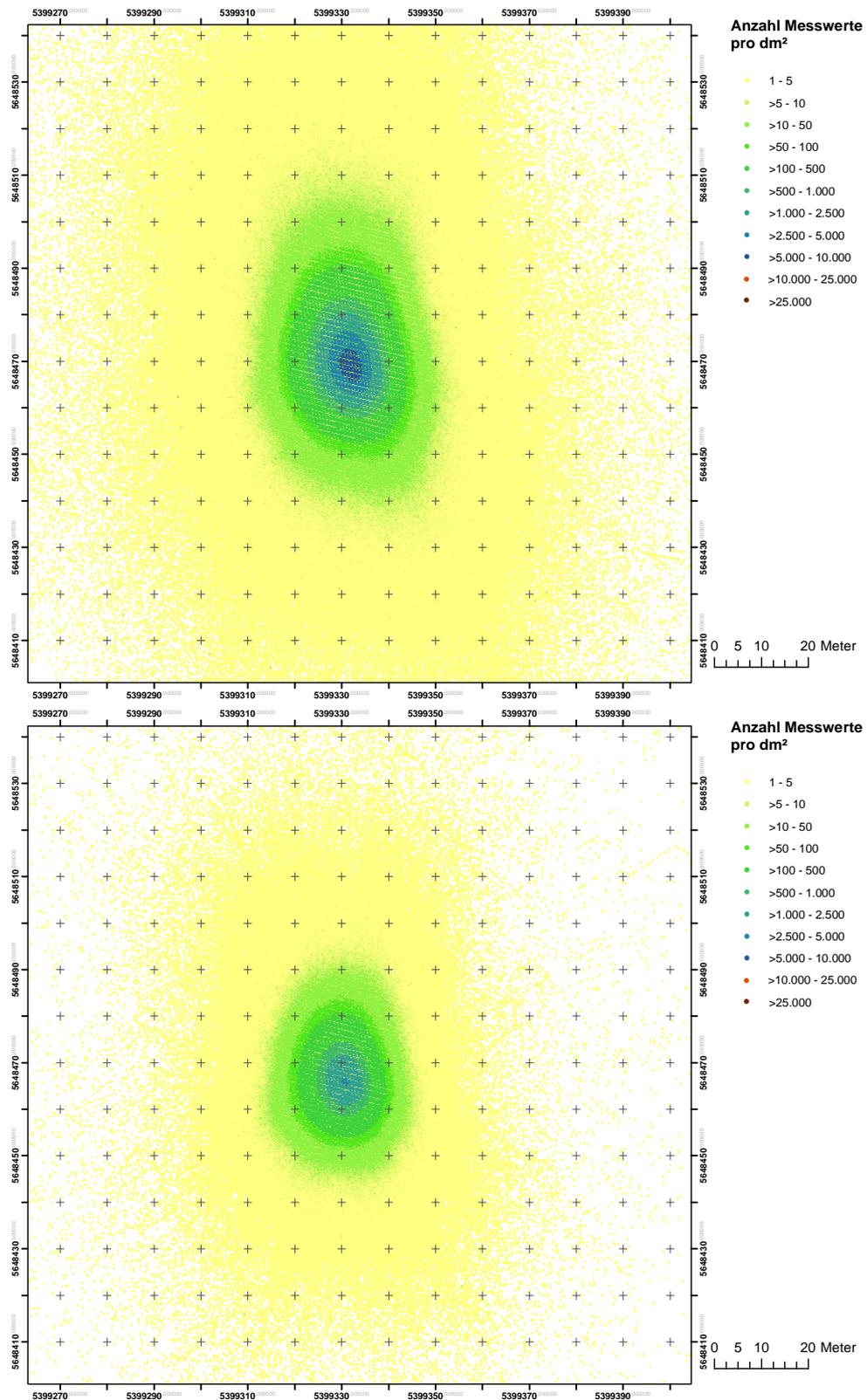


Abbildung C.4: Positionsdaten der GNSS-Empfänger
(oben: Dach 1, unten: Dach 2)

D Satellitendaten

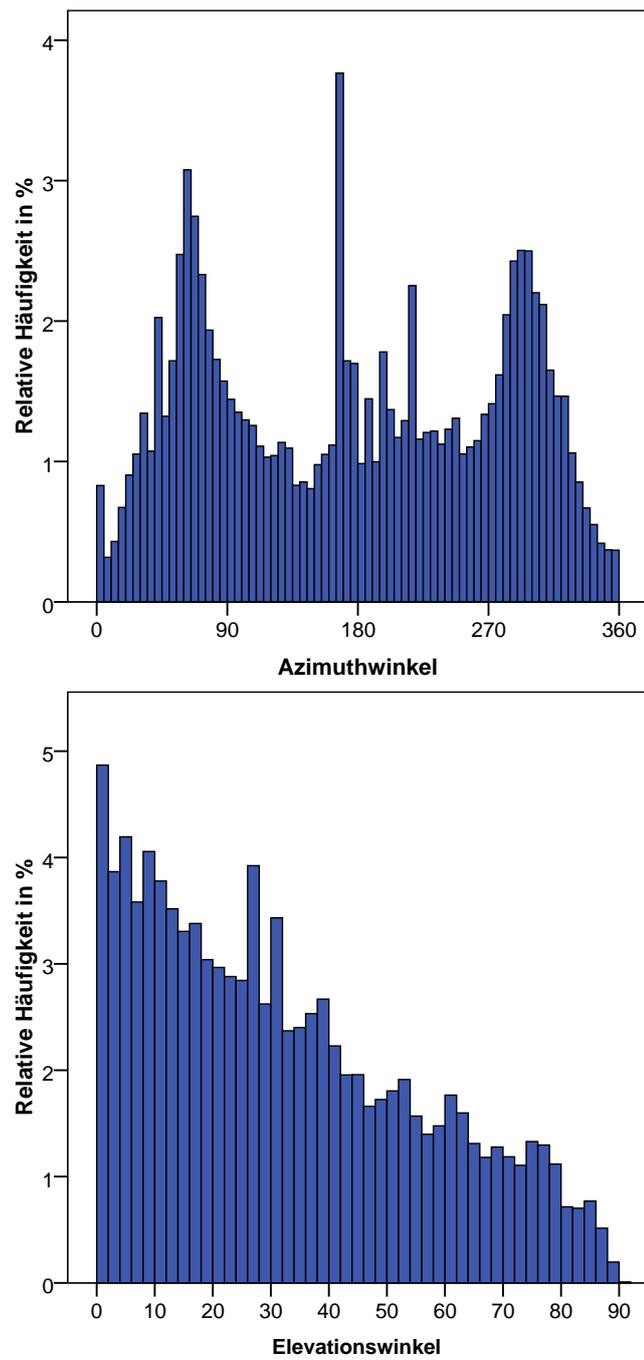


Abbildung D.1: Verteilung Satelliten nach Elevation und Azimuthwinkel

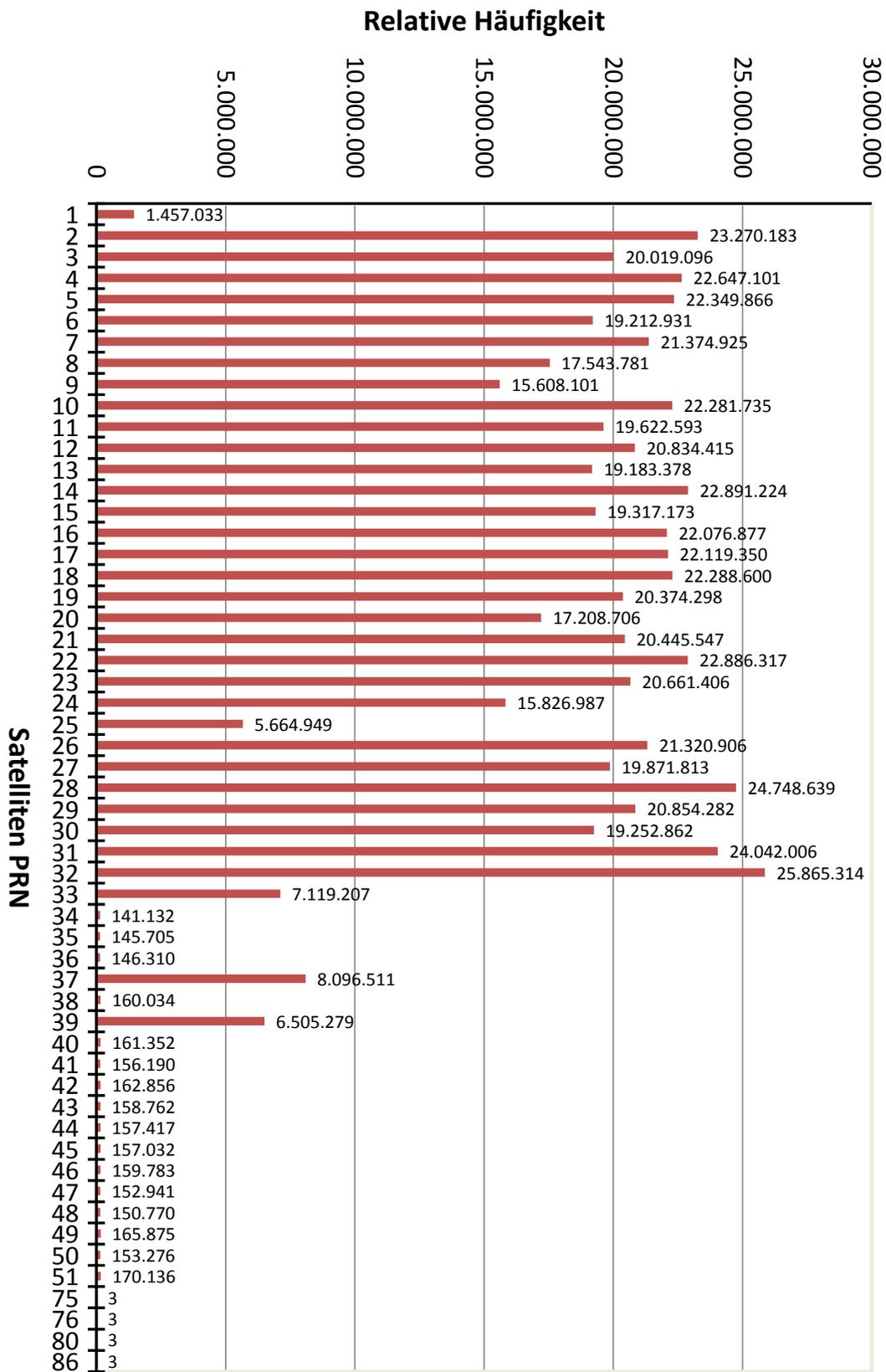


Abbildung D.2: Verteilung der registrierten Satelliten (PRN-Nummern)

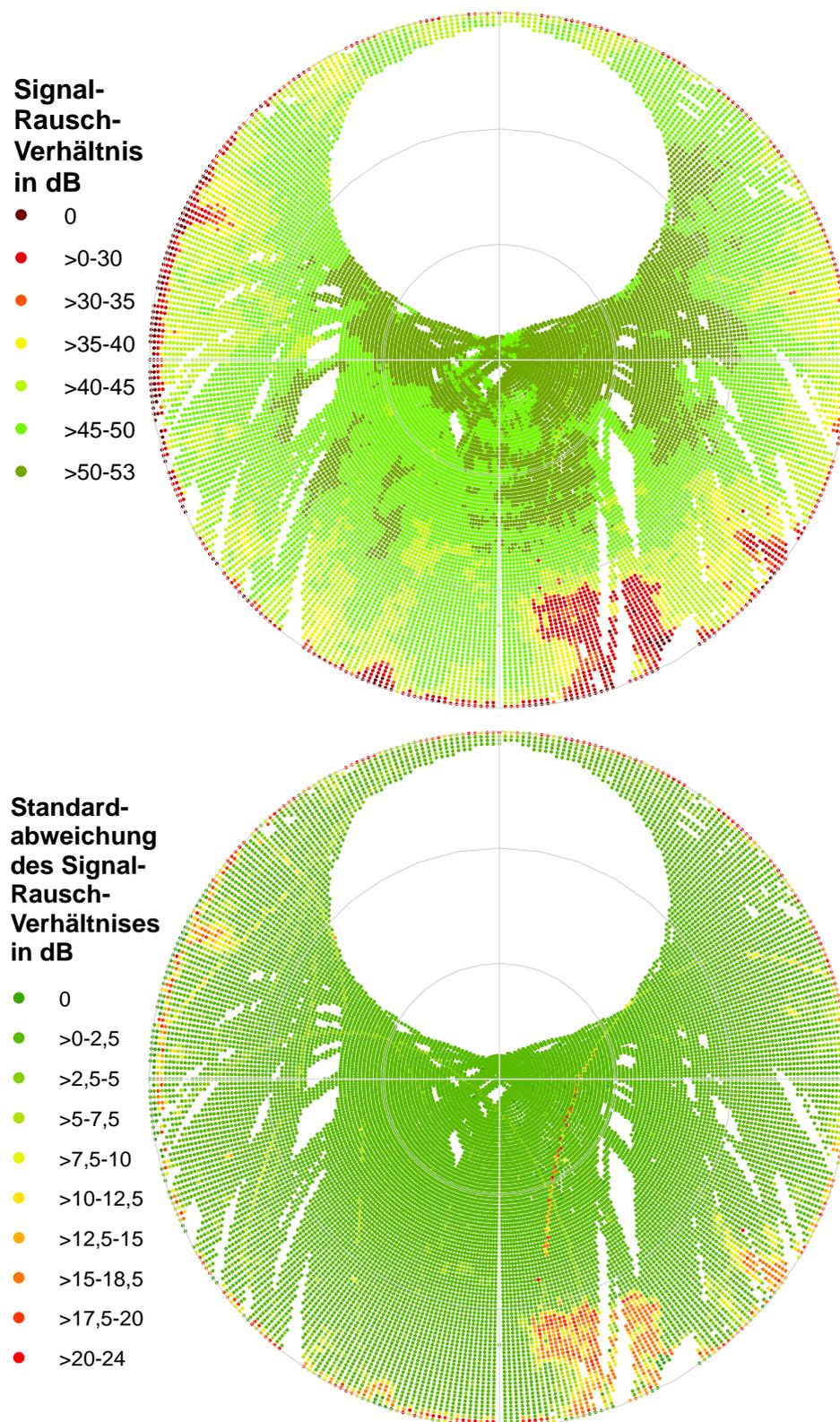


Abbildung D.3: Satellitenrauschverhältnis in dB des Empfängers 1 (Turm)
(oben: Absolute Werte, unten: Standardabweichung)

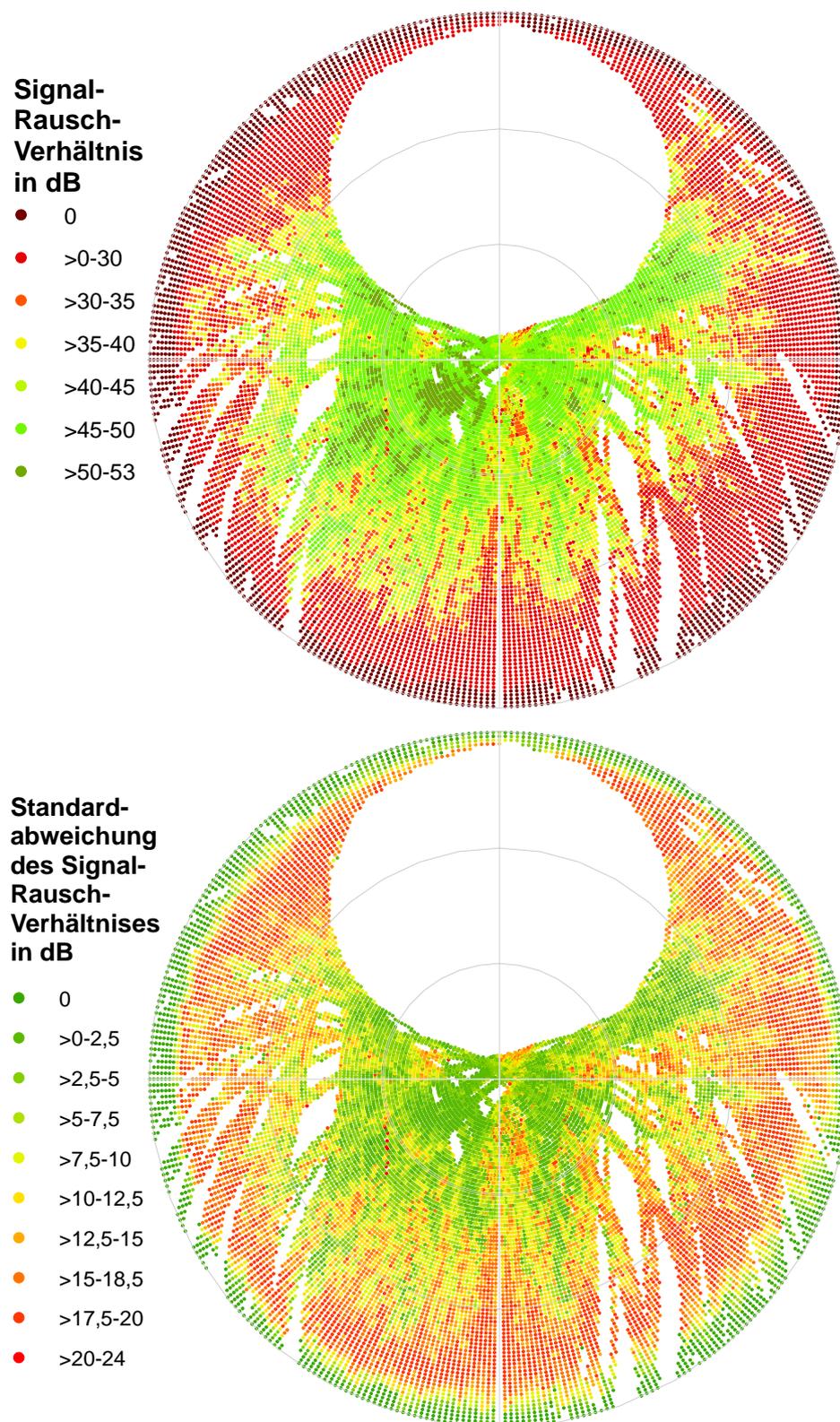


Abbildung D.4: Satellitenrauschverhältnis in dB des Empfänger 2 (Dach 1)
(oben: Absolute Werte, unten: Standardabweichung)

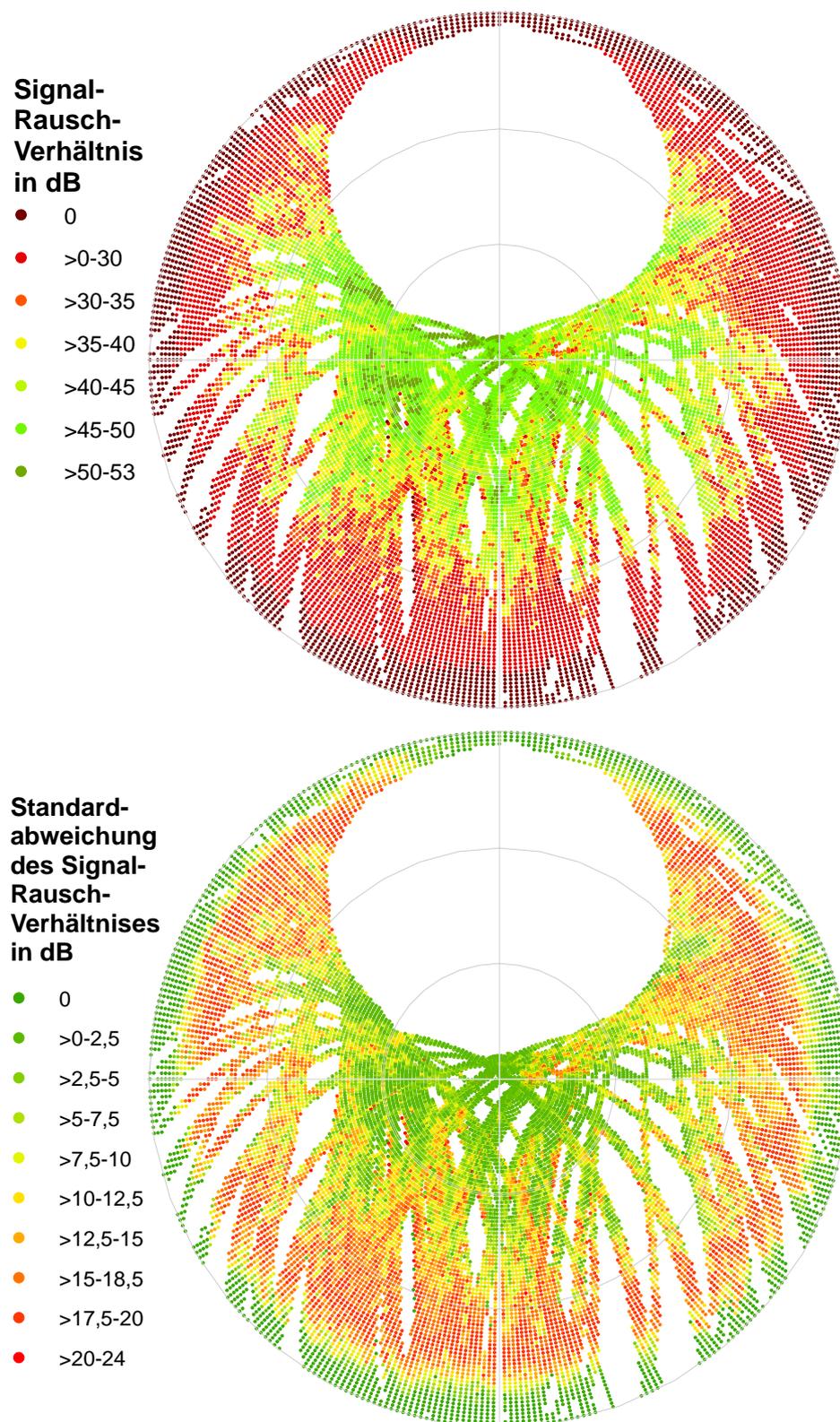


Abbildung D.5: Satellitenrauschverhältnis in dB des Empfänger 3 (Buche)
(oben: Absolute Werte, unten: Standardabweichung)

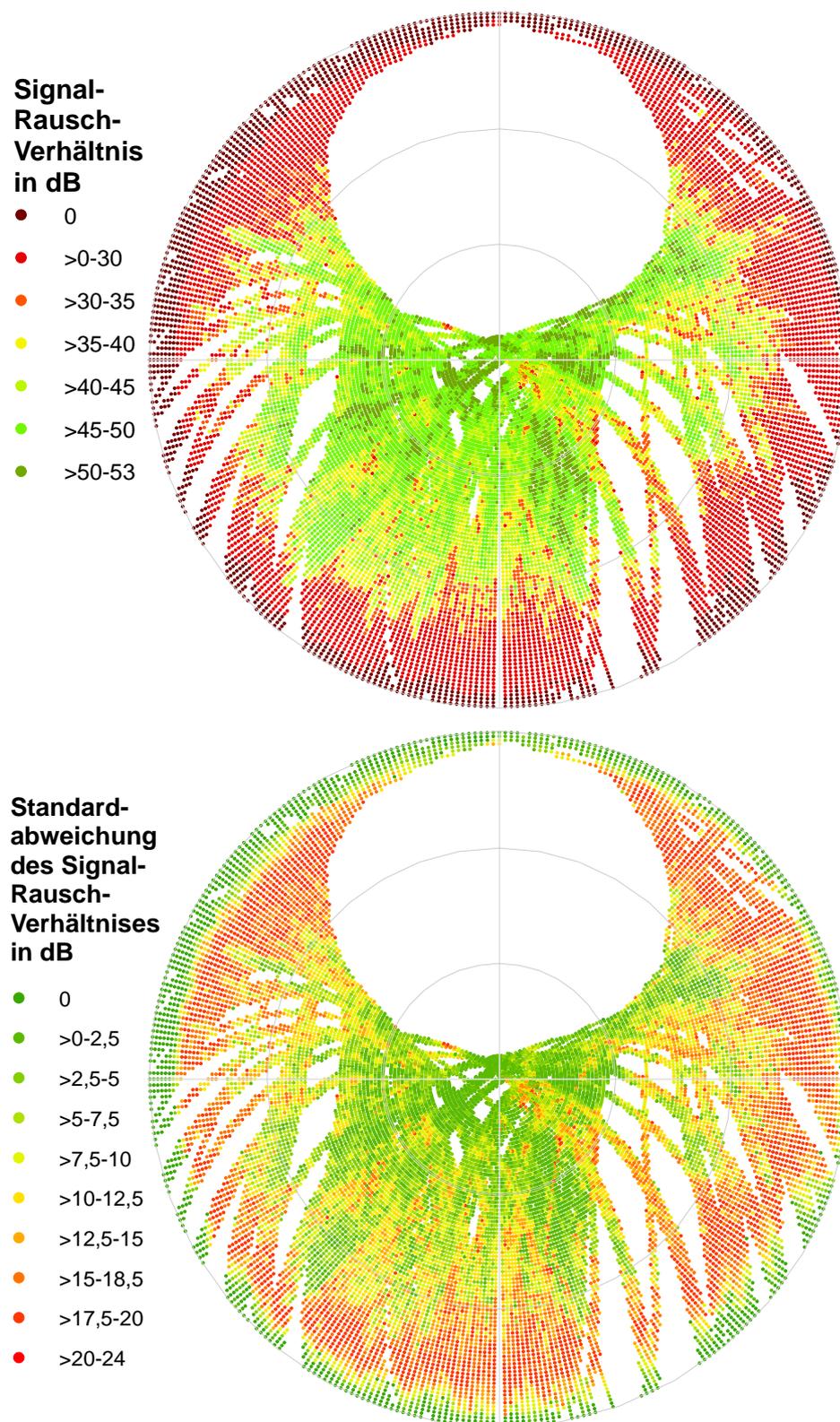


Abbildung D.6: Satellitenrauschverhältnis in dB des Empfänger 4 (Dach 2)
(oben: Absolute Werte, unten: Standardabweichung)

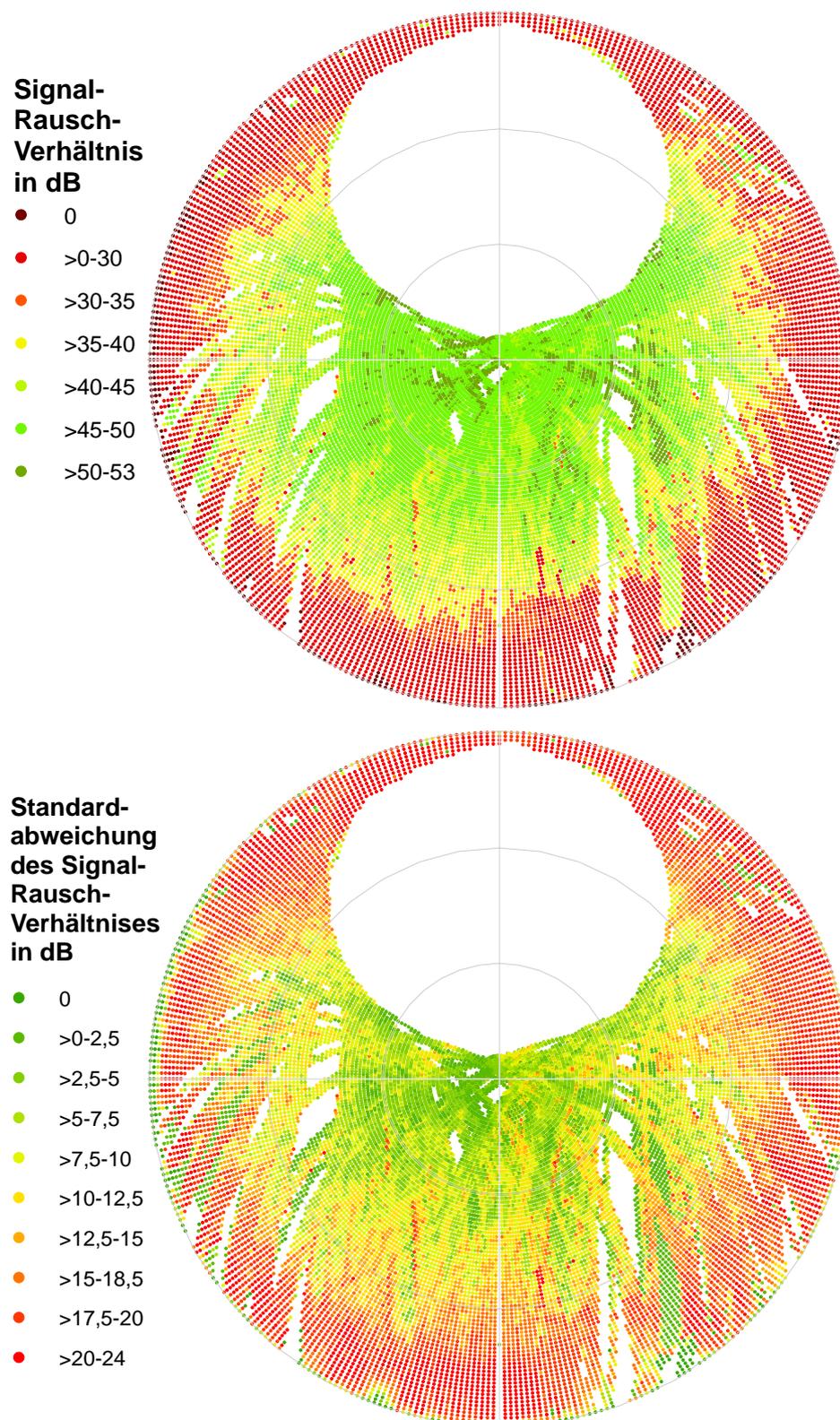


Abbildung D.7: Satellitenrauschverhältnis in dB aller Empfänger zusammen (oben: Absolute Werte, unten: Standardabweichung)

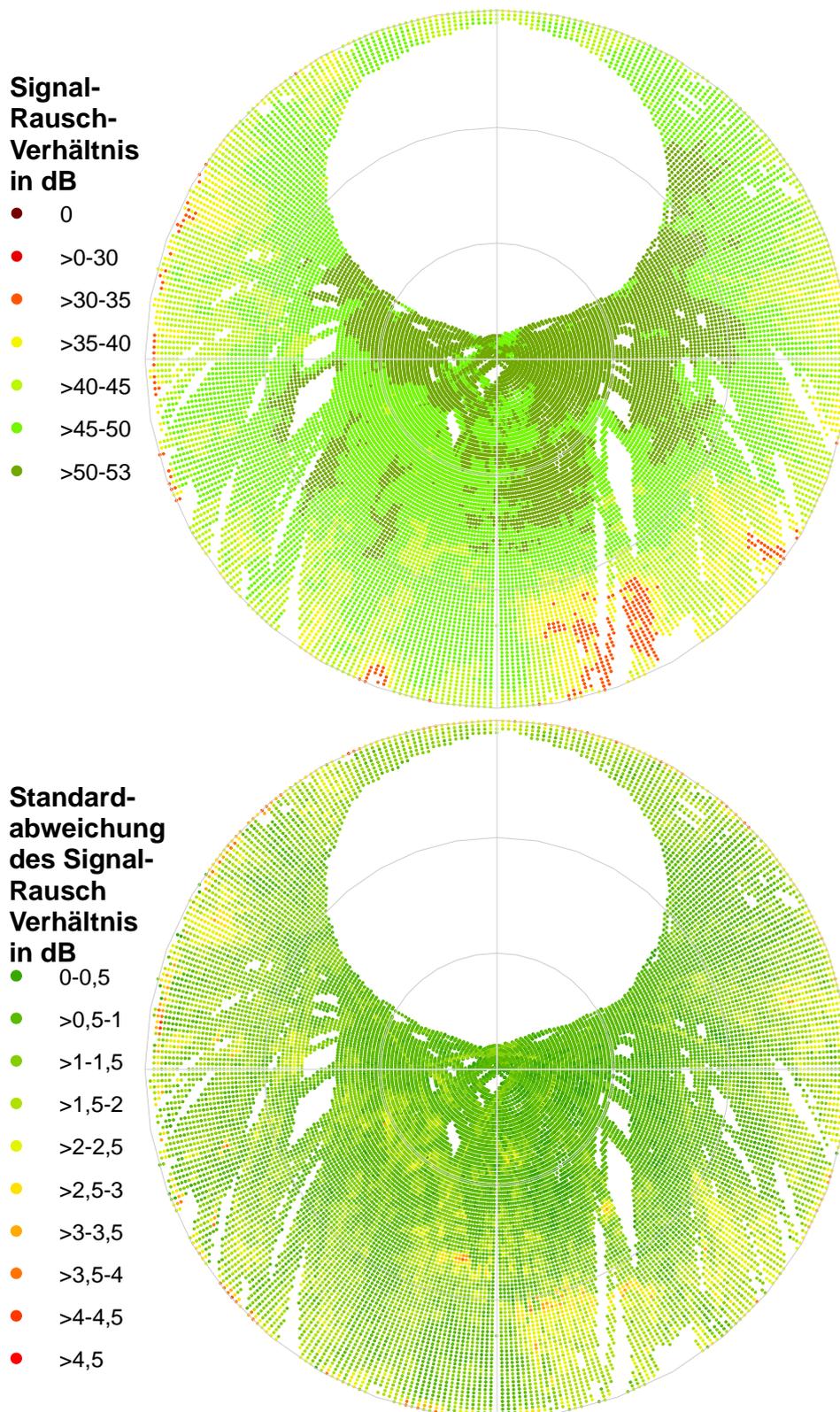


Abbildung D.8: Satellitenrauschverhältnis in dB des Empfänger 1 (Turm)
Berücksichtigung aller Satellitensignale ≥ 30 dB
(oben: Absolute Werte, unten: Standardabweichung)

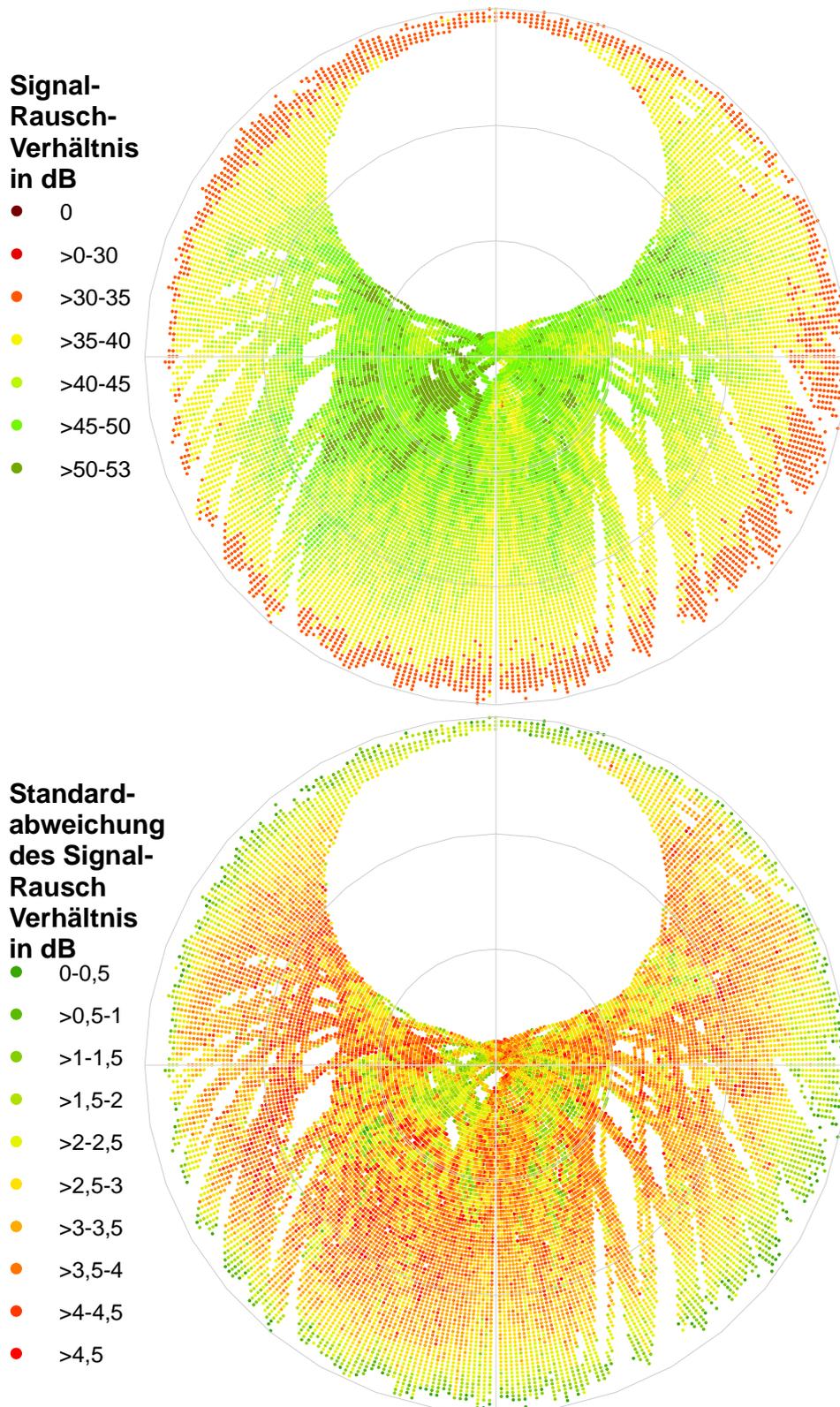


Abbildung D.9: Satellitenrauschverhältnis in dB des Empfänger 2 (Dach 1)
Berücksichtigung aller Satellitensignale ≥ 30 dB
(oben: Absolute Werte, unten: Standardabweichung)

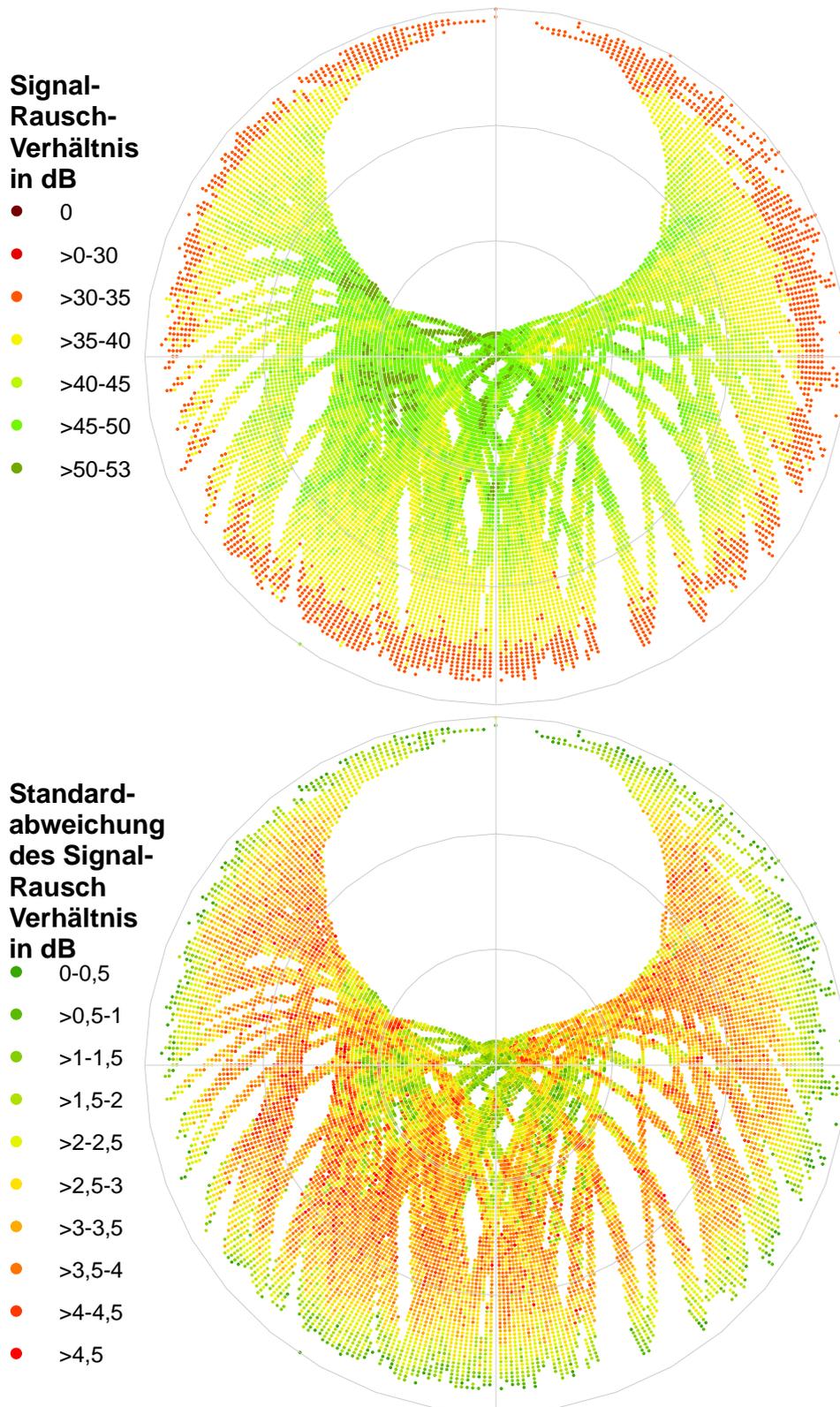


Abbildung D.10: Satellitenrauschverhältnis in dB des Empfänger 3 (Buche)
Berücksichtigung aller Satellitensignale ≥ 30 dB
(oben: Absolute Werte, unten: Standardabweichung)

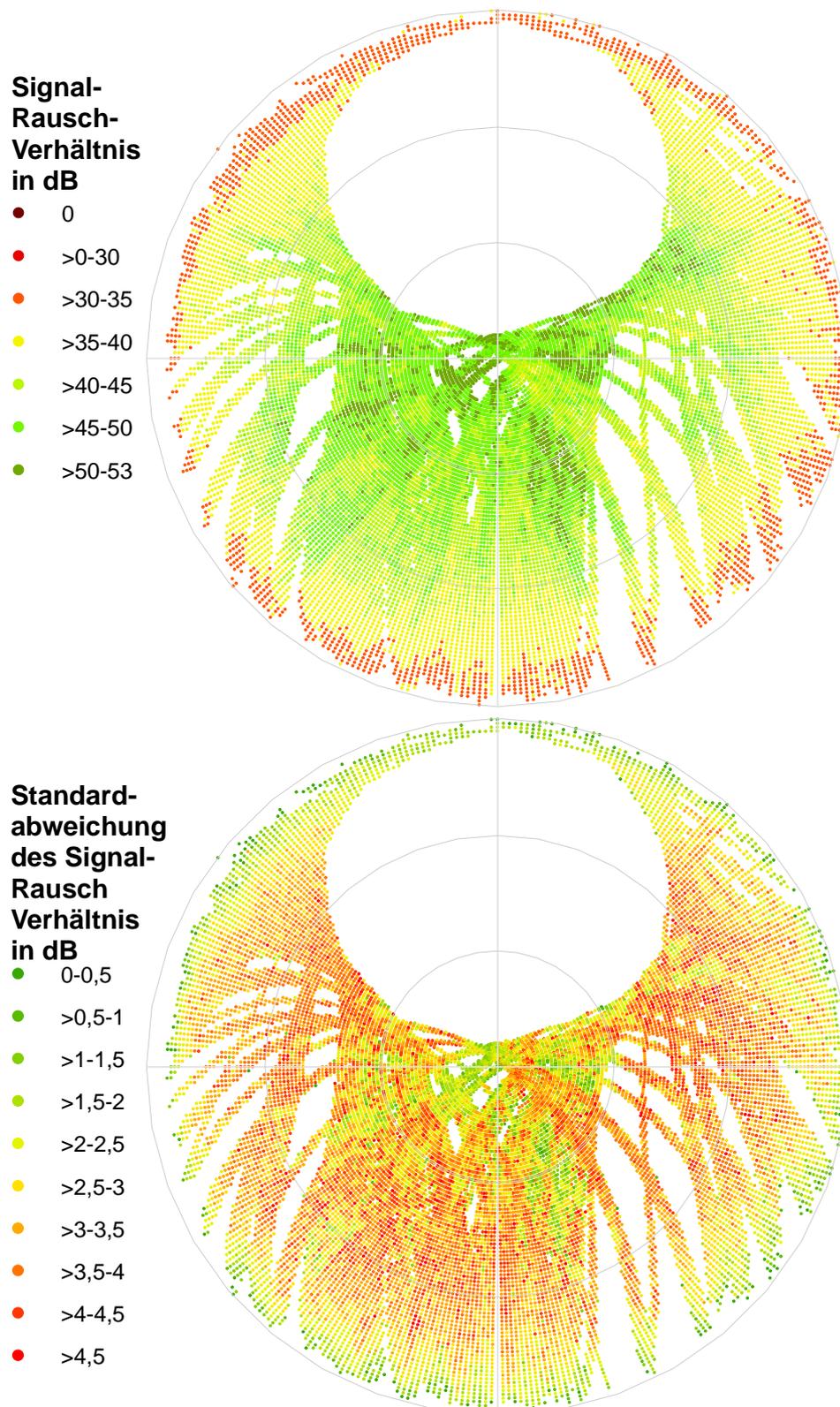


Abbildung D.11: Satellitenrauschverhältnis in dB des Empfänger 4 (Dach 2)
Berücksichtigung aller Satellitensignale ≥ 30 dB
(oben: Absolute Werte, unten: Standardabweichung)

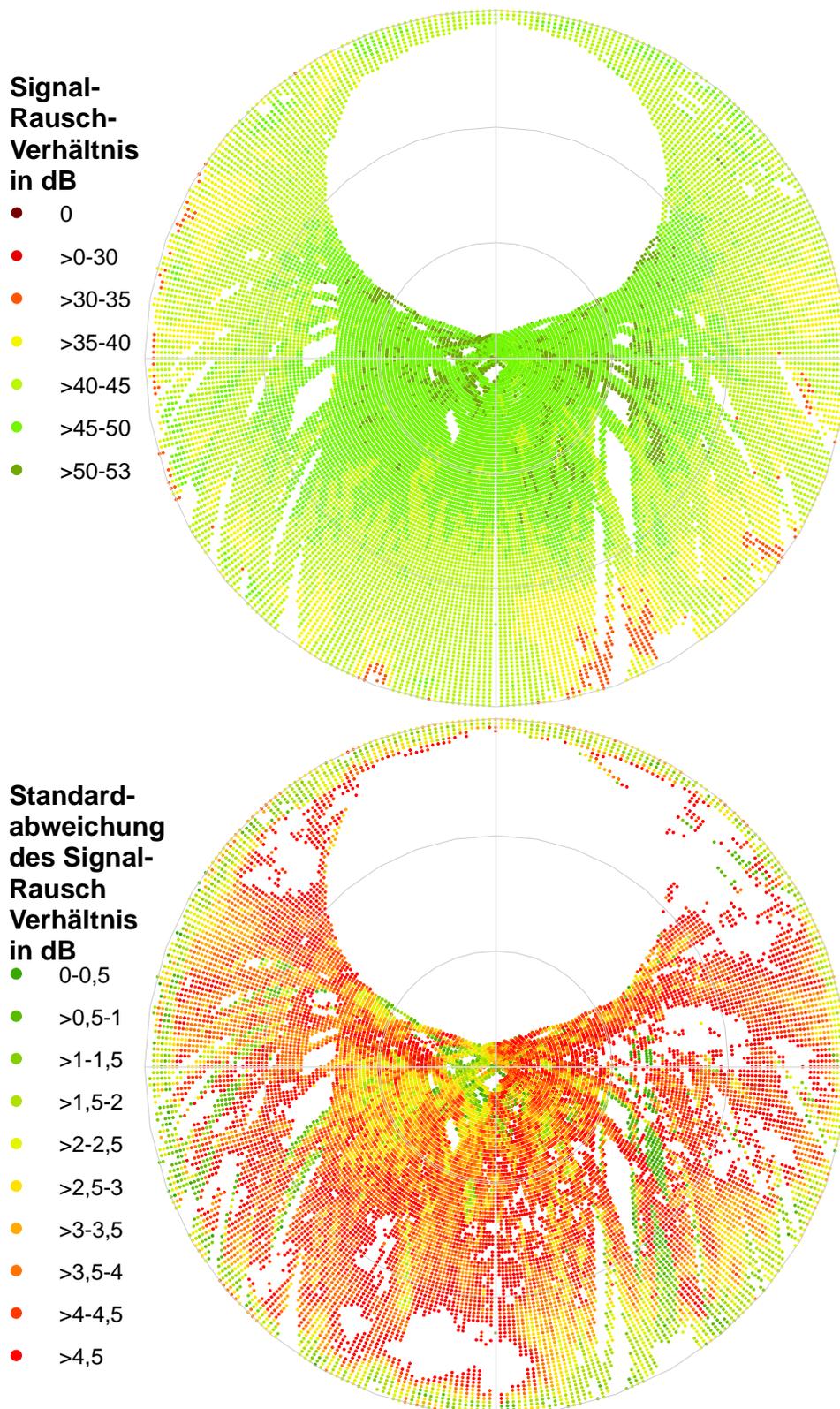


Abbildung D.12: Satellitenrauschverhältnis in dB aller Empfänger zusammen
Berücksichtigung aller Satellitensignale ≥ 30 dB
(oben: Absolute Werte, unten: Standardabweichung)

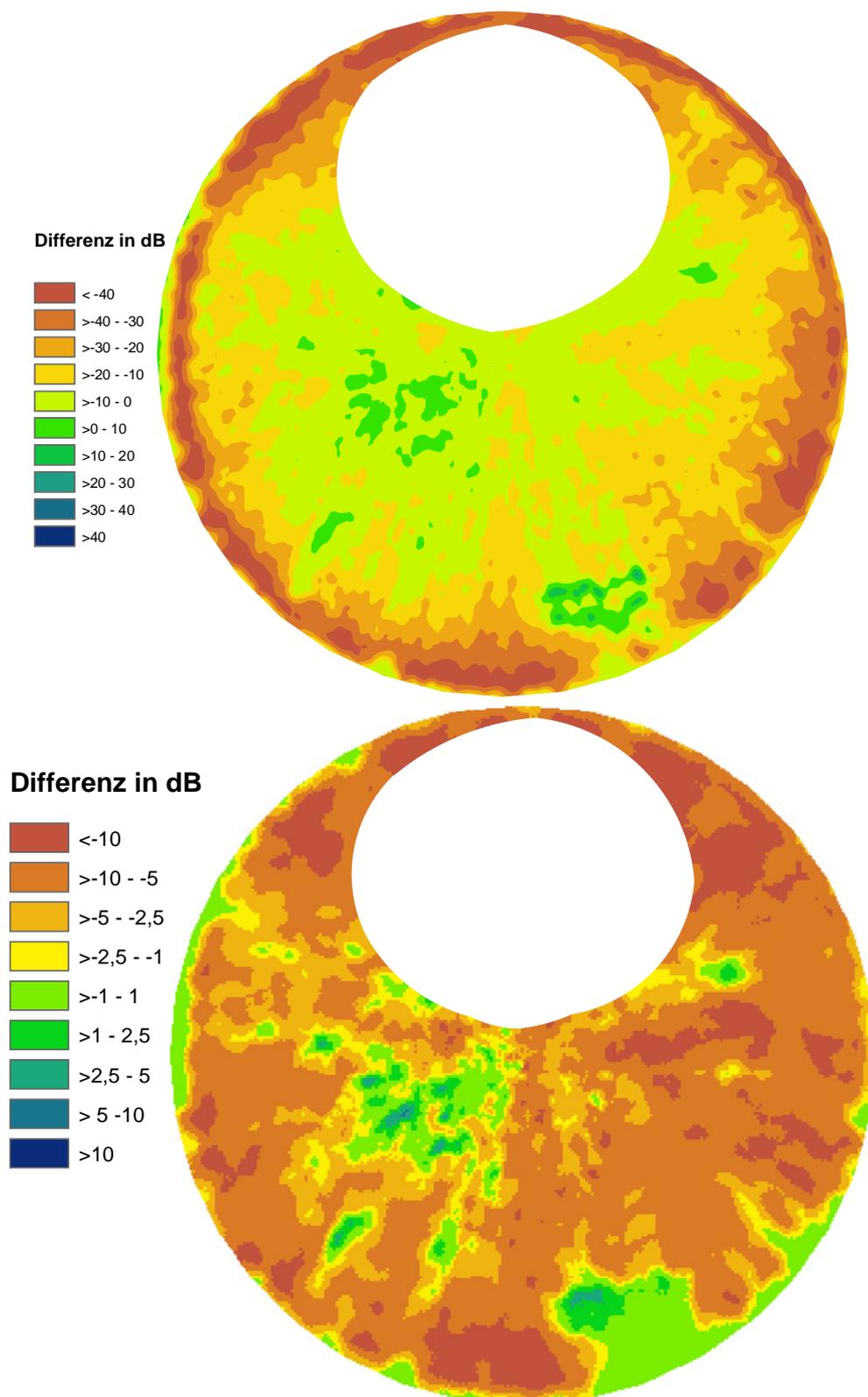


Abbildung D.13: Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse Dach 1 - Turm
(oben: Berücksichtigung aller Satelliten,
unten: Berücksichtigung Satelliten mit $\text{SNR} \geq 30$)

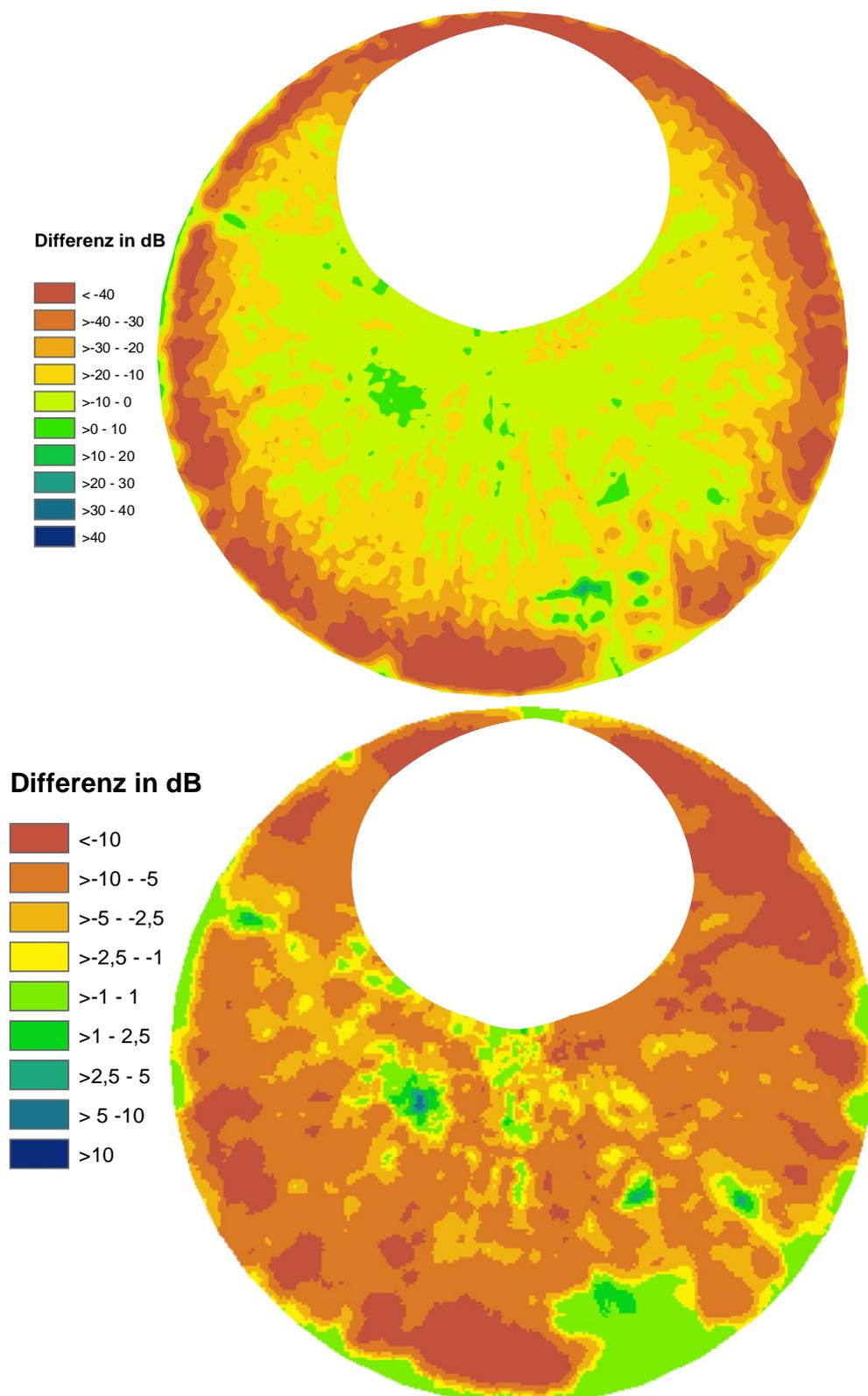


Abbildung D.14: Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse Buche - Turm
(oben: Berücksichtigung aller Satelliten,
unten: Berücksichtigung Satelliten mit $\text{SNR} \geq 30$)

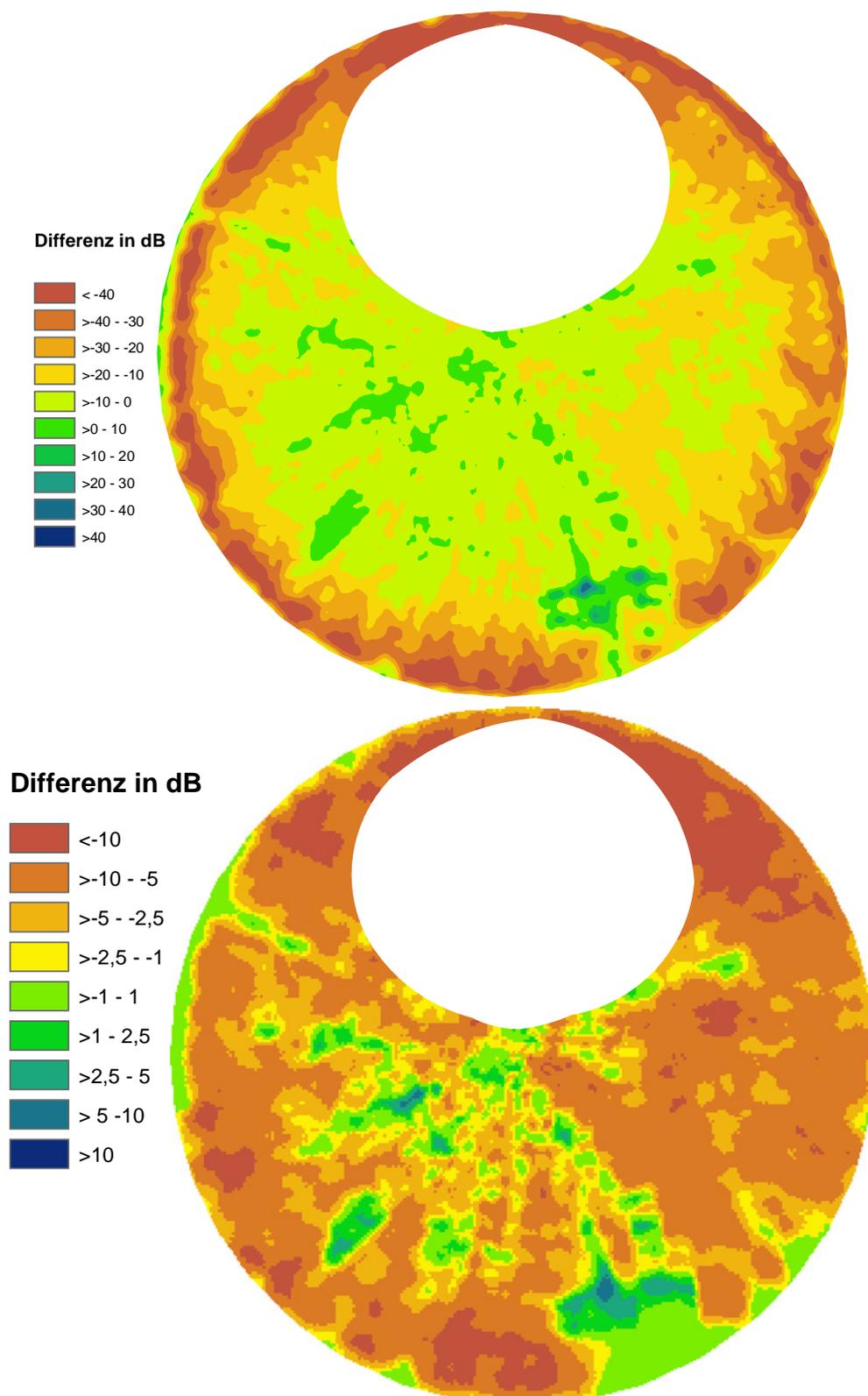


Abbildung D.15: Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse Dach 2 - Turm
(oben: Berücksichtigung aller Satelliten,
unten: Berücksichtigung Satelliten mit $\text{SNR} \geq 30$)

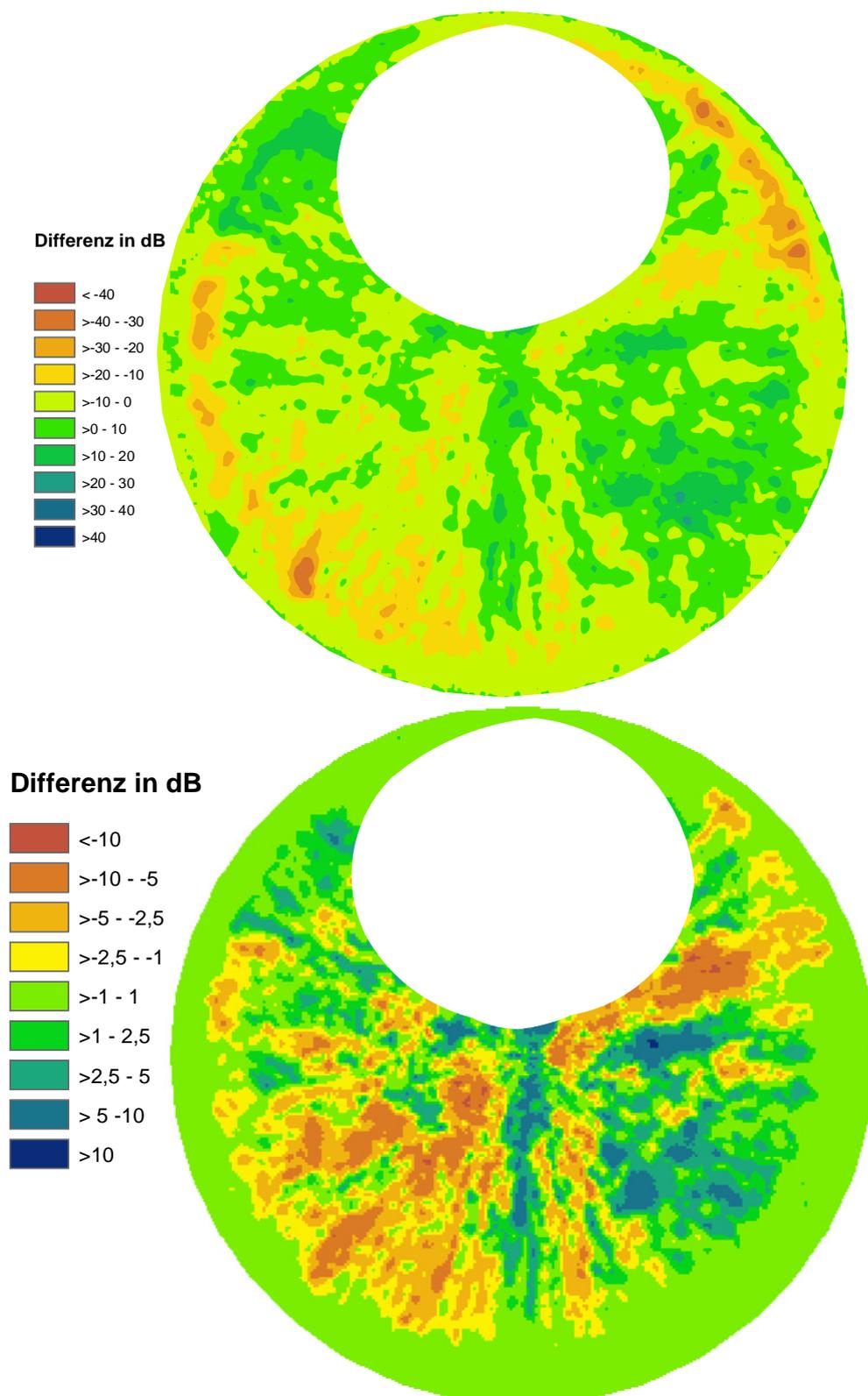


Abbildung D.16: Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse Buche - Dach 1
(oben: Berücksichtigung aller Satelliten,
unten: Berücksichtigung Satelliten mit $\text{SNR} \geq 30$)

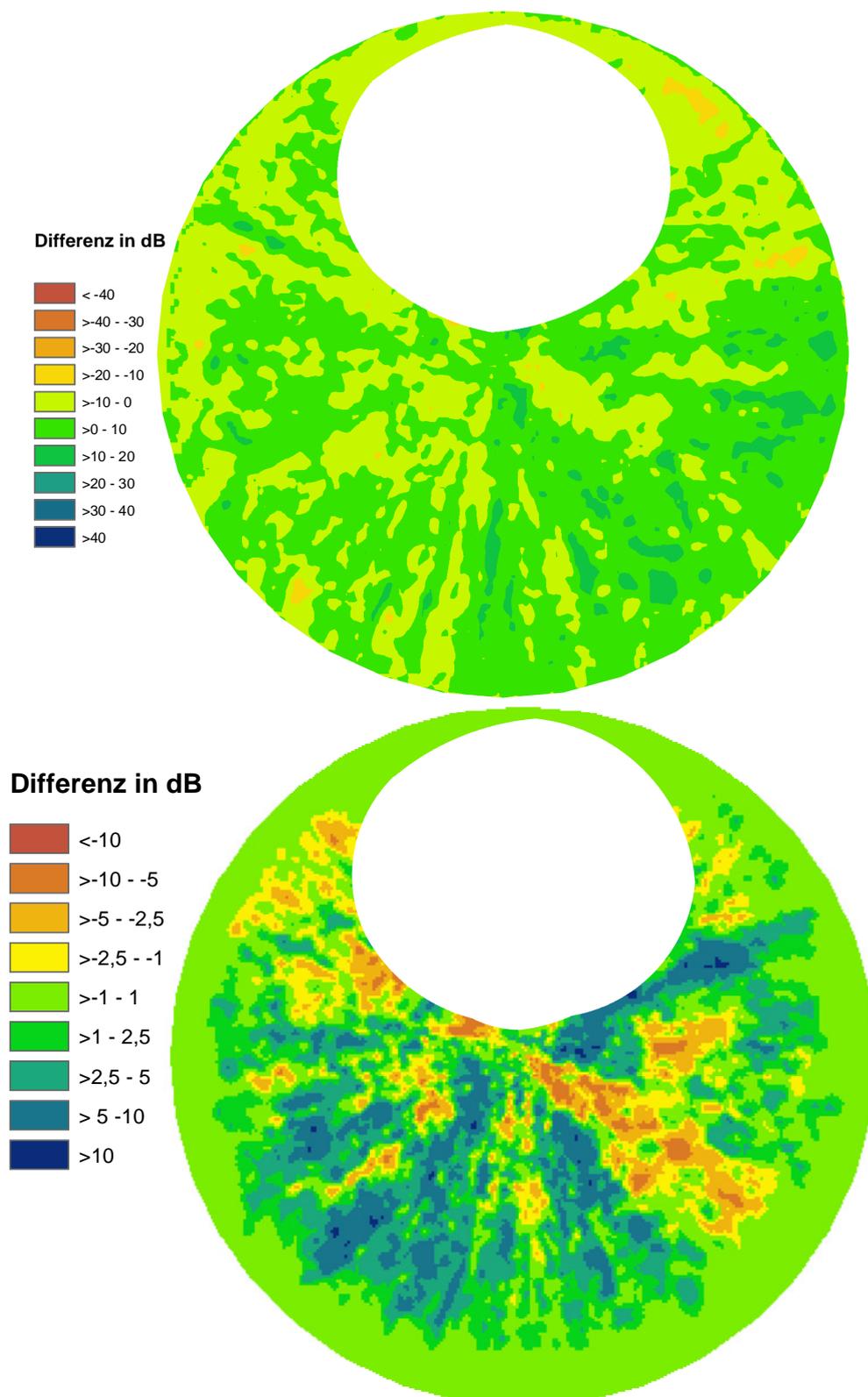


Abbildung D.17: Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse Dach 2 - Dach 1
(oben: Berücksichtigung aller Satelliten,
unten: Berücksichtigung Satelliten mit $\text{SNR} \geq 30$)

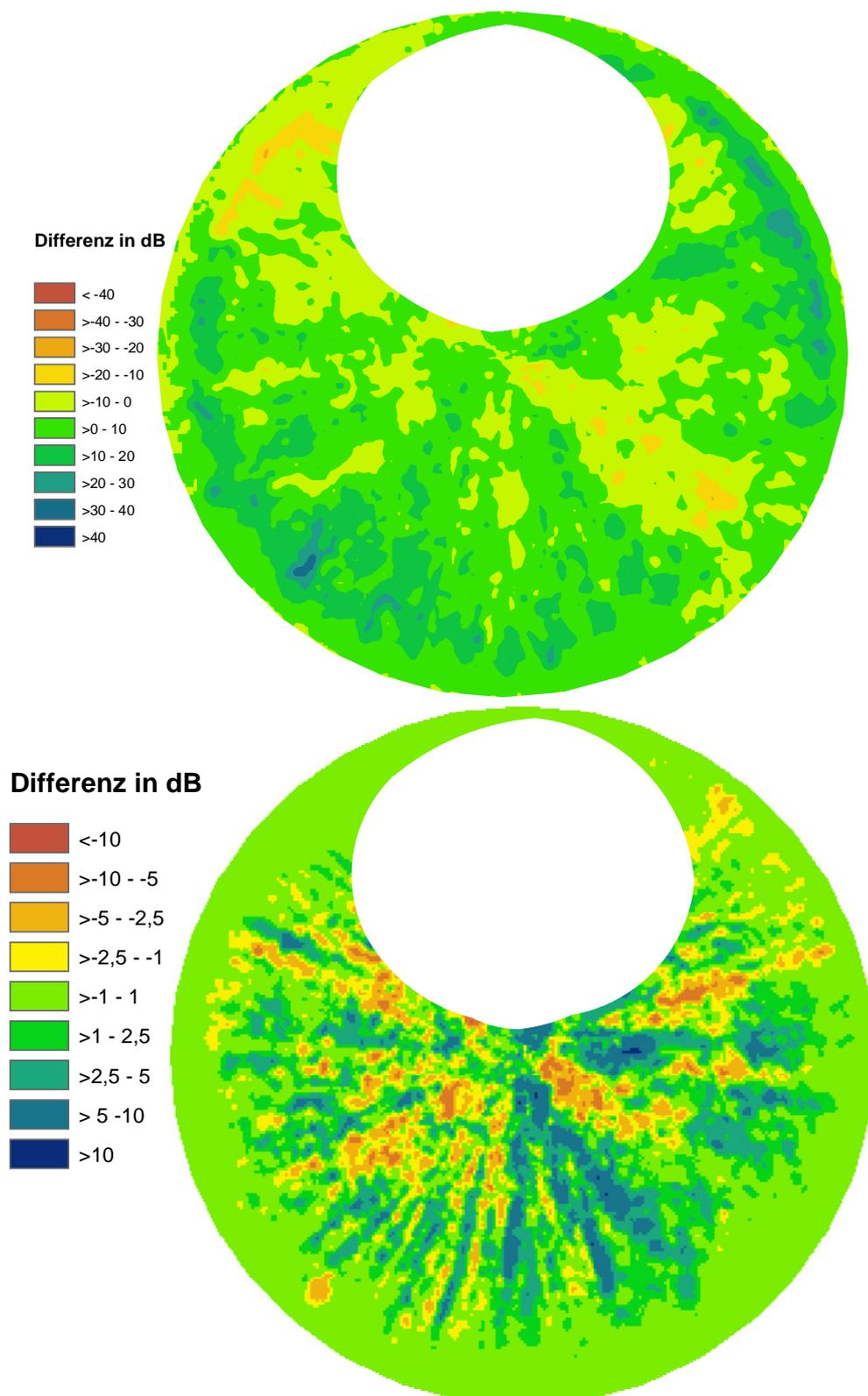


Abbildung D.18: Differenzen der Satellitenrauschverhältnisse Dach 2 - Buche
(oben: Berücksichtigung aller Satelliten,
unten: Berücksichtigung Satelliten mit $\text{SNR} \geq 30$)

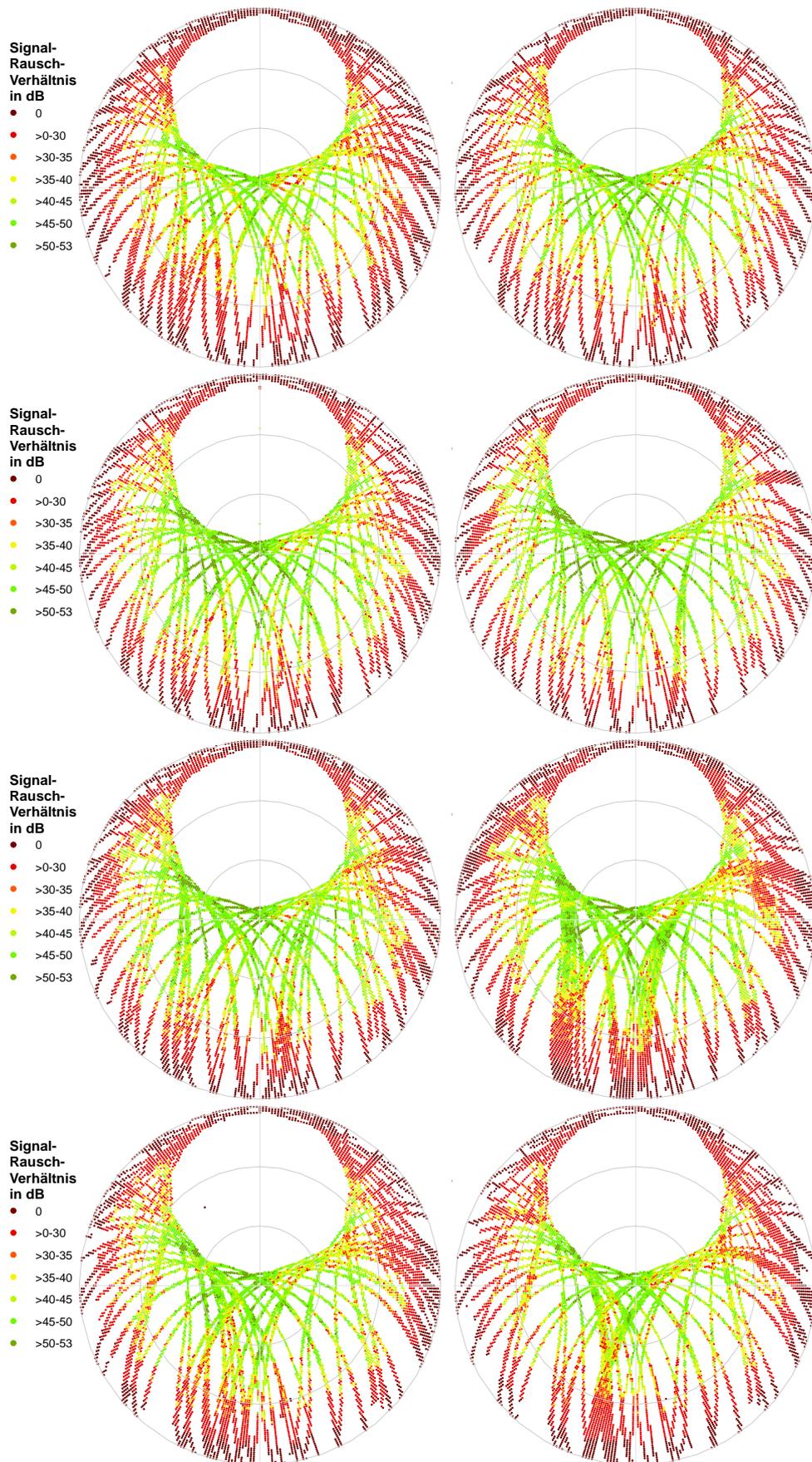


Abbildung D.19: Satellitenstärke nach Monaten (Buche, alle Satelliten)
(1. Reihe: Okt. 09, Nov 09; 2. Reihe Dez. 09, Jan 10,
3. Reihe: Feb. 10, März 10; 4. Reihe: April 10, Mai 10)

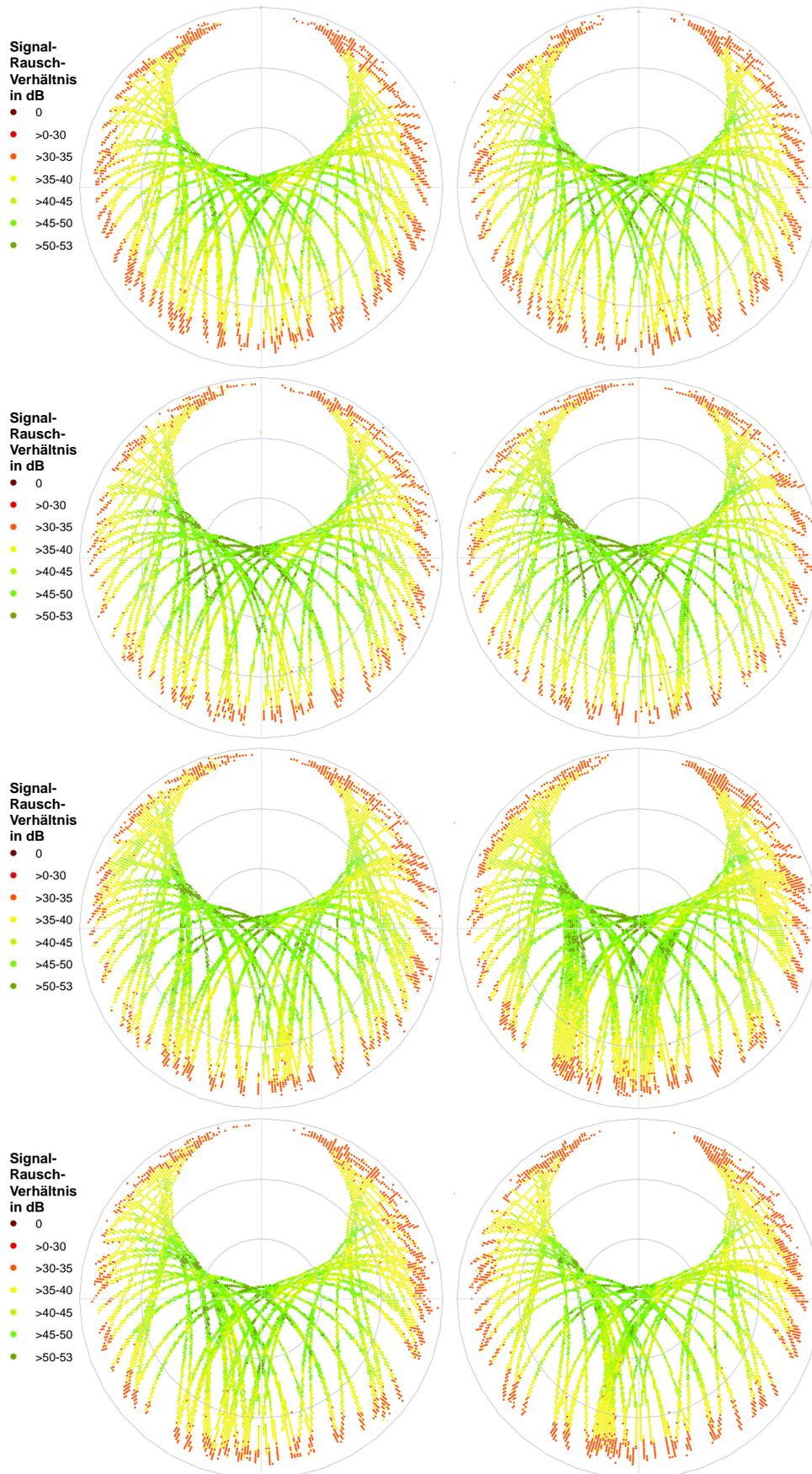


Abbildung D.20: Satellitenstärke nach Monaten (Buche, Satelliten SNR ≥ 30 dB)
(1. Reihe: Okt. 09, Nov 09; 2. Reihe Dez. 09, Jan 10,
3. Reihe: Feb. 10, März 10; 4. Reihe: April 10, Mai 10)

E Genauigkeitsindikatoren

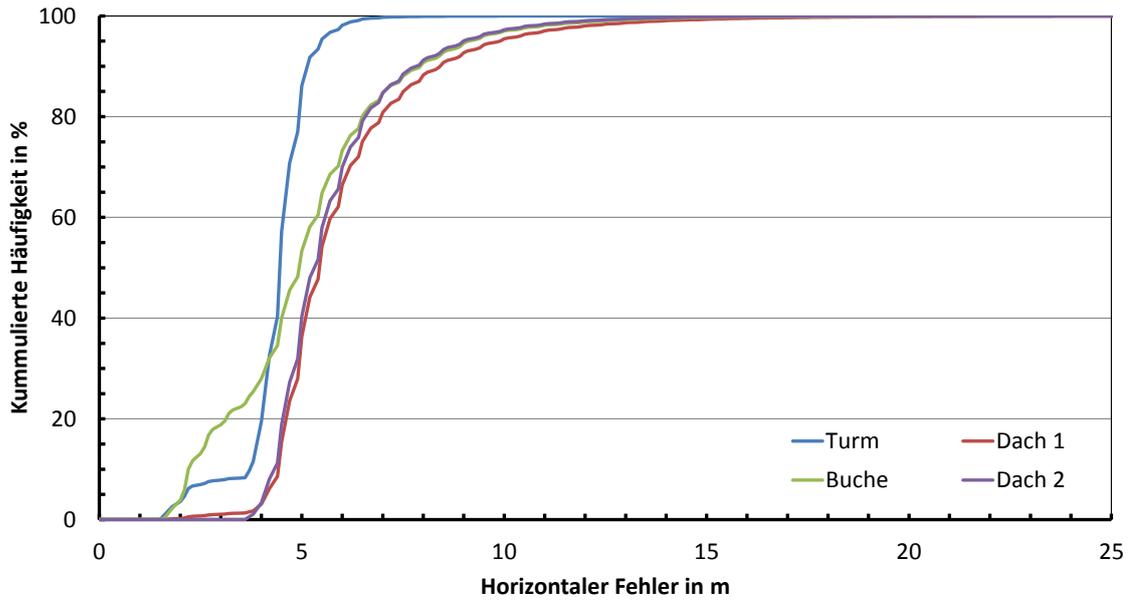


Abbildung E.1: Histogramm Horizontaler Fehler der verschiedenen GNSS-Empfänger

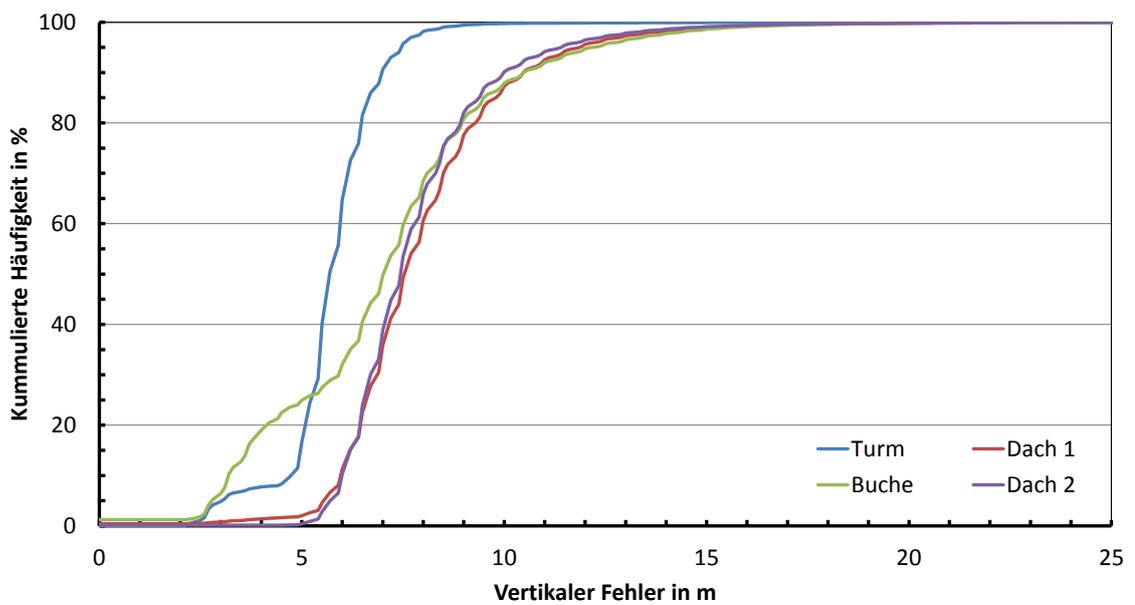


Abbildung E.2: Histogramm Vertikaler Fehler der verschiedenen GNSS-Empfänger

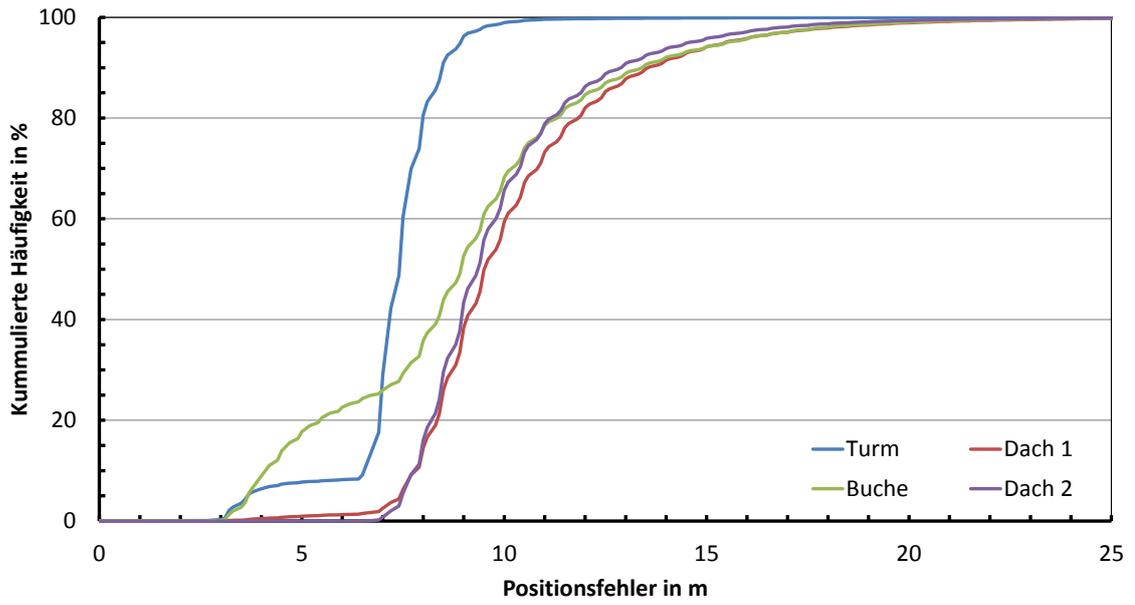


Abbildung E.3: Histogramm Positionfehler der verschiedenen GNSS-Empfänger

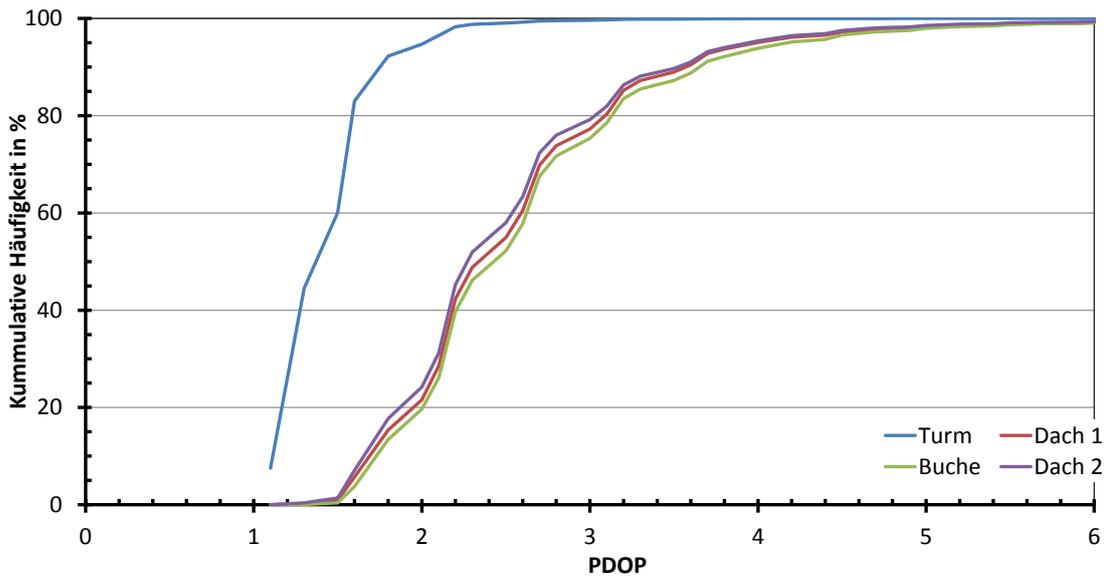


Abbildung E.4: Histogramm PDOP der verschiedenen GNSS-Empfänger

F Ausgewählte SQL Anweisungen

```
CREATE TABLE geodaten.Satelliten_E2minusE1b
SELECT
sd1.datum,sd1.satnr,
sd1.'Elevation' as Elevation,
sd1.'Azimuth' as Azimuth,
sd1.'Elevation'-st.'Elevation' as dElevation,
sd1.'Azimuth'-st.'Azimuth' as dAzimuth,
sd1.'Strength'-st.'Strength' as dStrength,
sd1.'Active' as ActiveE2,
st.'Active' as dActiveE1
FROM geodaten.Satelliten_1hz_ohneAR st INNER JOIN
geodaten.Satelliten_1hz_ohneAR sd1 ON st.Datum=sd1.datum
WHERE st.satNr=sd1.satNr AND
sd1.gnss_empf=2 AND st.gnss_empf=1;
```

SQL-Anweisung F.1: Beispiel für die Erzeugung der von Differenz-Satellitendaten

```
SELECT
s.'Azimuth' AS Azimuth,
s.'Elevation' AS Elevation,
AVG(s.'Strength') AS Strength,
COUNT(s.'Active') AS Active,
SUM(s.'Active') AS Active
FROM geodaten.satelliten_1hz s
WHERE gnss_empf=4
GROUP BY s.'Azimuth',s.'Elevation' ;
```

SQL-Anweisung F.2: Beispiel für die Erzeugung der SkyPlot-Daten

```
SELECT
DATE_FORMAT(s.datum,' %y- %m- %d') as DatumTag,
s.Active as Activ,
s.'Strength' as Stren,
s.'gnss_empf' as empf,
count(s.'Strength') as StrengthAnzahl
FROM geodaten.satelliten_1hz s
group by Stren,empf,DatumTag,Activ ;
```

SQL-Anweisung F.3: Beispiel für die Erzeugung von zeitlich gruppierten Daten

```

CREATE TABLE geodaten.GNSS_daten_30min_Wetter_E2ME1
SELECT DATE_FORMAT(ADDDATE(MIN(g.datum),INTERVAL 30 MINUTE), ' %y- %m-
%d %H: %i: %s') as 'Datum',
MEDIAN(g.'dHighGeo') AS MedianHighGeo,
MEDIAN(g.'dHighSL') AS MedianHighSL,
MEDIAN(g.'dSatTrack') AS SMedianattract,
MEDIAN(g.'dSatView') AS MedianSatView,
MEDIAN(g.'dFixMode') AS MedianFixMode,
MEDIAN(g.'dPDOP') AS MedianPDOP,
MEDIAN(g.'dHDOP') AS MedianHDOP,
MEDIAN(g.'dVDOP') AS MedianVDOP,
MEDIAN(g.'drw') AS MedianRW,
MEDIAN(g.'dhw') AS MedianHW,
MEDIAN(g.'dHErrror') AS MedianHErrror,
MEDIAN(g.'dVErrror') AS MedianVErrror,
MEDIAN(g.'dPosError') AS MedianPosError,
AVG(g.'dHighGeo') AS AVGHHighGeo,
AVG(g.'dHighSL') AS AVGHHighSL,
AVG(g.'dSatTrack') AS AVGSattract,
AVG(g.'dSatView') AS AVGSatView,
AVG(g.'dFixMode') AS AVGFixMode,
AVG(g.'dPDOP') AS AVGPDOP,
AVG(g.'dHDOP') AS AVGHDOP,
AVG(g.'dVDOP') AS AVGVDOP,
AVG(g.'drw') AS AVGRW,
AVG(g.'dhw') AS AVGHW,
AVG(g.'dHErrror') AS AVGHerrror,
AVG(g.'dVErrror') AS AVGVerrror,
AVG(g.'dPosError') AS AVGPosError,
STD(g.'dHighGeo') AS STDHighGeo,
STD(g.'dHighSL') AS STDHighSL,
STD(g.'dSatTrack') AS STDSattract,
STD(g.'dSatView') AS STDSatView,
STD(g.'dFixMode') AS STDFixMode,
STD(g.'dPDOP') AS STDPDOP,
STD(g.'dHDOP') AS STDHDOP,
STD(g.'dVDOP') AS STDVDOP,
STD(g.'drw') AS STDRW,
STD(g.'dhw') AS STDHW,
STD(g.'dHErrror') AS STDHErrror,
STD(g.'dVErrror') AS STDVErrror,
STD(g.'dPosError') AS STDPosError
FROM geodaten.gnss_daten_E2minuse1 g
GROUP BY YEAR(datum), MONTH(datum), DAY(datum), HOUR(datum),
TRUNCATE(MINUTE (datum)/30,0);

```

SQL-Anweisung F.4: Beispiel für die 30-Minuten Gruppierung von Differenz-Postitionsdaten

G Technische Spezifikationen

Electrical		Interfaces	
Input voltage:		Serial interface:	
GPS 16 LVS:	3.3 to 6 Vdc regulated to <100 mV ripple	Port 1:	True RS-232 output, asynchronous serial input compatible with RS-232 or TTL voltage levels, RS-232 polarity
GPS 16/17 HVS:	8 to 40 Vdc unregulated	Port 2:	Asynchronous serial input only, compatible with RS-232 or TTL voltage levels, RS-232 polarity
Input current:		Baud rates:	
GPS 16 LVS:	65 mA (typical)	300/600/1200/2400/4800/9600/19200/38400	
GPS 16/17 HVS:	60 mA @ 8 Vdc; 40 mA @ 12 Vdc; 15 mA @ 40 Vdc	Serial format:	
Sensitivity:		Port 1:	
-165 dBW minimum		Selectable between NMEA 0183 v2.00, NMEA 0183 v3.00, and Garmin binary formats; NMEA 0183 v2.0 (ASCII); Approved output sentences: GPALM, GPGGA, GPGLL, GPGSA, GPGSV, GPRMC, GPVTG; Proprietary sentences: PGRMB, PGRME, PGRMF, PGRMM, PGRMT, PGRMV	
GPS performance		Port 2:	
Receiver:		RTCM input only; RTCM SC-104 differential input message types 1, 2, 3, 7 and 9	
WAAS enabled; 12 parallel channel GPS receiver continuously tracks and uses up to 12 satellites to compute and update your position		PPS output:	
Acquisition times:*		1 Hz pulse, programmable width, 1 microsecond accuracy	
Reacquisition:	Less than 2 seconds	Power control:	
Warm:	Approximately 15 seconds	OFF — open	
Cold:	Approximately 45 seconds	ON — pull down to less than 0.3 Vdc	
AutoLocate™:	5 minutes	Environmental	
SkySearch:	5 minutes	Temperature:	
Update rate:		Operating:	
1 to 900 seconds between updates; programmable in 1 second increments		-30° to 80°C	
GPS accuracy:		Storage:	
Position:	< 15 meters, 95% typical**	-40° to 80°C	
Velocity:	0.1 knot RMS steady state	Physical	
DGPS (USCG) accuracy:		Size:	
Position:	3-5 meters, 95% typical	GPS 16:	3.58" (91 mm) diameter, 1.65" (42 mm) high
Velocity:	0.1 knot RMS steady state	GPS 17:	3.58" (91 mm) diameter, 3.6" (91.5 mm) high
DGPS (WAAS) accuracy:		Weight:	
Position:	< 3 meters, 95% typical	GPS 16:	6.4 oz. (181 g) without cable
Velocity:	0.1 knot RMS steady state	11.7 oz. (332 g) with 5 meter cable	
Dynamics:		GPS 17:	7.1 oz. (201 g) without cable;
999 knots, 6g's		16.8 oz. (476 g) with 30 foot cable	
Map datums:		Cable:	
108 predefined, 1 user		Foil-shielded 8 conductor 28 AWG RJ-45 RJ-45	
		GPS 16:	JST ZHR-8 connector housing with 8 JST SZH-002T-PO.5 pin socket contacts
		GPS 17:	JST ZHR-8 connector housing with 8 JST SZH-002T-PO.5 pin socket contacts

Abbildung G.1: Technische Spezifikationen Garmin GPS 16 (GARMIN 2005)

G. Technische Spezifikationen

	LEAGACY-E	LEGACY-H
DESCRIPTION	40 channels GPS+ receiver, rugged aluminium housing with MINTER interface	
TRACKING SPECIFICATIONS		
Tracking channels	40 L1 GPS/GLONASS 20 L1/L2 GPS/GLONASS	GG-40 L1 GPS/GLONASS GD-20 L1/L2 GPS
Signals tracked	L1/L2 C/A and P Code & Carrier	
PERFORMANCE SPECIFICATIONS		
Baseline accuracy	3mm + 0.5ppm for L1 + L2 5mm + 0.5ppm for L1	
RTK (OTF) Accuracy	10mm + 1.0ppm for L1 + L2 15mm + 1.0ppm for L1	
Cold Start	<60 seconds	
Warm Start	<10 seconds	
Reacquisition	<1 second	
POWER SPECIFICATIONS		
Battery	1 x external	
External power input	6 to 28 volts DC	
Power consumption	3.3 Watt	1.8 – 2.4 Watt
GPS ANTENNA SPECIFICATIONS		
GPS Antenna	External	
Antenna Type	Microstrip (Zero-Centered)	
Ground Plane	Antenna on a flat ground plane or Choke Ring	
RADIO SPECIFICATIONS		
UHF Radio Modem	External	
Base Power Output	0.5W/2.0W/35W	
I/O		
Communication Ports	4x serial (RS232)	
Other I/O Signals	1pps, Event Marker/Frequency I/O	1pps, Event Marker
Status Indicator	2x3-color LED's, two-function keys (MINTER)	
Control & Display Unit	External: Topcon FC-1000, Husky Fex21, Ranger or other 3rd Party	
MEMORY & RECORDING		
Internal Memory	Up to 96 Mbytes	
Raw Data Recording	Up to 20 times per seconds per second (20Hz)	
Data Type	Code and Carrier from L1 and L2 GPS & GLONASS	Code and Carrier from L1 and L2 GPS
DATA OUTPUT		
Real time data outputs	RTCM SC104 version 2.2	
ASCII Output	NMEA 0183 version 2.2	
Other Outputs	JPS Format	
Output Rate	Up to 20 times per second (20Hz)	
ENVIRONMENTAL & PHYSICAL SPECIFICATIONS		
Enclosure	Aluminum extrusion, waterproof	
Operating Temperature	-40°C to 55°C / -40°F to 130°F	
Dimensions	23 x 11 x 3.5 cm 8.8 x 4.3 x 3.5 inches	15 x 11 x 3.5 cm 5.9 x 4.3 x 1.4 inches
Weight	0.6 kg / 21 ounces	0.4 kg / 14 ounces

Abbildung G.2: Technische Spezifikationen Topcon Legacy E (TOPCON 2004)

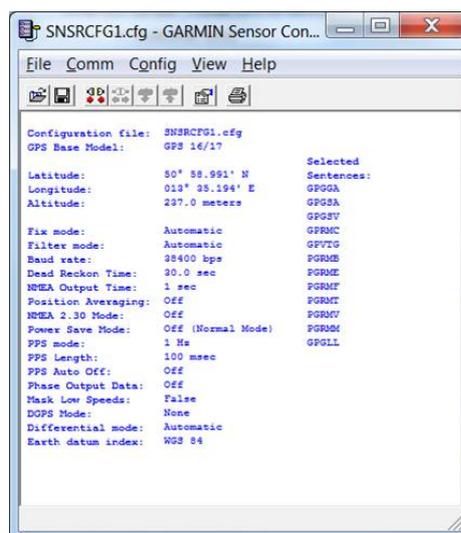


Abbildung G.3: Verwendete Einstellungen Garmin GPS 16

H Entwickelte Software

GNSS-Analyser Die Software „GNSS_Analyser“ dient der Aufnahme, Verwaltung und Auswertung von GNSS-Daten [↗113](#) und wurde mittels Borland Delphi 2008[®] erstellt. Die in vorliegender Untersuchung verwendeten Hauptfunktionen sind:

- **Aufnahme (Logging) der GNSS-Daten**

Die NMEA-Daten des jeweiligen GNSS- [↗113](#) bzw. GPS-Empfängers [↗114](#) werden per serieller Schnittstelle empfangen und separat in eine Datei geschrieben. Diese wird täglich geändert und eine Sicherheitskopie auf einer 2. Festplatte angelegt.

- **Parsen der GNSS-Daten**

Die Logging-Dateien der verschiedenen Empfänger sind jeweils in einem separaten Verzeichnis angeordnet. Mit der Option „NMEAtoDB“ werden nach der Eingabe eines Verzeichnisses alle sich darin befindlichen NMEA-Quelldaten nacheinander eingelesen, geparsed [↗115](#) dabei in ihre Variablen zerlegt und für den Import in die Datenbank vorbereitet.

Zusätzlich zu den GPS-NMEA-Daten kann die erstellte Software sowohl die GNSS-NMEA-Daten sowie das Topcon Positions System Protokoll (TPS) [↗117](#) des Empfängers Topcon Legacy E analysieren und verarbeiten. Bei diesen kommen zusätzlich Informationen über die GLONASS-Satelliten hinzu.

- **Koordinatentransformation**

Die Koordinaten der GPS-Daten liegen im Referenzsystem WGS84 [↗118](#) vor. Diese werden von der Software mithilfe eines vom Autor implementierten Algorithmus mittels Helmert-Transformation [↗114](#) in das amtliche Referenzsystem des Freistaates Sachsen: DE RD/83 / GK 3 im 5. Meridianstreifen [↗116](#) überführt. Dabei sind die Parameter der Transformation frei einstellbar.

- **Einlesen in Datenbank**

Die geparsen und transformierten Daten werden automatisch in eine MySQL-Datenbank geschrieben.

- **Analyse**

Für die Analyse stehen verschiedene flexible Auswertungen zur Verfügung. Dafür werden die Daten per SQL-Befehl aus der Datenbank gelesen und automatisch analysiert. Ein Beispiel ist die Koordinatenberechnung der Elevations- und Azimutthdaten (siehe Formeln [4.3](#) und [4.4](#)).

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden sind entsprechend gekennzeichnet.

Tharandt, 24.09.2010

Dr. Thomas Purfürst