

Hosentaschenphotogrammetrie für die Waldinventur

Benjamin WILD¹, Christoph NEUMAYR¹, Norbert PFEIFER¹, Milutin MILENKOVIC², Florian HOFHANSL², Jodok BATLOGG³, und Markus HOLLAUS¹

¹ Department für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien, 1040-Wien · [vorname].[nachname]@geo.tuwien.ac.at

² International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2361-Laxenburg · [nachname]@iiasa.ac.at

³ Tree.ly GmbH, 6850-Dornbirn · jodok@tree.ly

Zusammenfassung

Die Erfassung des Baumbestands ist ein zentraler Bestandteil der Forstwissenschaft, -wirtschaft und -verwaltung. Sie spielt eine wesentliche Rolle bei der Quantifizierung der oberirdischen Biomasse, der Biodiversität sowie bei der Analyse der Auswirkungen von Abholzung und Klimawandel auf den Wald als Lebens- und Wirtschaftsraum. Fortschritte in der Sensortechnologie, die in Smartphones integriert sind, bieten vielversprechende Perspektiven für die Waldinventur. Diese Technologien könnten die Effizienz der Messungen verbessern und es auch Laien ermöglichen, aktiv an der Waldinventur teilzunehmen.

Im Rahmen des Citizen-Science-Projekts C4C (<https://iiasa.ac.at/projects/c4c>) werden sowohl das Potenzial als auch die Grenzen von Smartphone-basierten Anwendungen zur Unterstützung der Waldinventur untersucht. Darüber hinaus werden Brücken geschlagen, um die gesammelten Smartphone-Daten mit Informationen von terrestrischen und flugzeuggetragenen Laserscannern (TLS und ALS) sowie frei zugänglichen Satellitendaten (z.B. Sentinel-1 und -2) zu verknüpfen. Ziel ist es, die großflächige Kartierung von Baumarten und oberirdischer Biomasse zu verbessern.

Dieser Beitrag beleuchtet zunächst den aktuellen Stand der Waldinventurtechnologien und untersucht anschließend die Auswertung von Brusthöhendurchmesser- und Baumhöhenmessungen, die mittels verschiedener Smartphone-Apps in einem Testgebiet im Wiener Prater durchgeführt wurden. Als Referenz für die Smartphone-basierten Messungen dienen TLS-Messungen sowie traditionell aufgenommene Baumparametermessungen. Ziel ist es, herauszufinden, welches Potenzial Smartphone-Anwendungen für die Waldinventur bieten und ob "Hosentaschenphotogrammetrie" in der Lage ist, etablierte Messprotokolle und Instrumente zu ergänzen oder sogar zu ersetzen.

1 Einführung

Ein effektives Waldmonitoring ist ein entscheidender Bestandteil einer verantwortungsvollen Waldbewirtschaftung und nachhaltigen Planung, die die Bemühungen zur Erhaltung der biologischen Vielfalt, zur Ressourcenbewirtschaftung und zur Bekämpfung des bzw. Anpassung an den Klimawandel unterstützen. Der Zugang zu genauen, aktuellen Daten über den Zustand der Wälder ist unerlässlich, um die oberirdische Biomasse (Englisch: Above Ground

Biomass, AGB) zu bemessen – ein wichtiger Indikator für die Gesundheit und Produktivität des Ökosystems.

Die AGB dient als zentraler Maßstab zur Bewertung von Nahrungs- und Brennstoffressourcen, der Erhaltung der Bodengesundheit sowie dem Management von Feuer- und Wassersystemen. Sie ist zudem ein wesentlicher Faktor für die biologische Vielfalt und die Analyse von Kohlenstoffemissionen, insbesondere bei natürlichen oder menschlich bedingten Störungen (HOUGHTON ET AL., 2009). Die Überwachung der AGB ist daher von großer Bedeutung für Studien zur Biodiversität (z.B. SIRY ET AL., 2005) und spielt eine Schlüsselrolle bei der Einschätzung von Kohlenstoffvorräten. Diese sind für das Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs und seiner Auswirkungen auf das Klima von zentraler Bedeutung (z.B. AVITABILE ET AL., 2016).

Wälder speichern mehr als 70 % der globalen AGB (HOUGHTON ET AL., 2009), jedoch bleibt eine präzise Schätzung der AGB aufgrund der ungleichmäßigen und oft begrenzten Verteilung von Probenahmen eine Herausforderung. Dies führt zu erheblichen Unsicherheiten in deren Quantifizierung. Im Folgenden beschreiben wir verschiedene Methoden am Stand der Wissenschaft, die AGB in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösungen zu quantifizieren, unter besonderer Beachtung der Hostentaschenphotogrammetrie.

1.1 Destruktive Messmethoden und allometrische Modelle

Für die genaueste Messung von AGB werden bei traditionellen Feldmethoden Bäume gefällt und die einzelnen Bestandteile getrocknet und gewogen oder geometrisch durch Messen der einzelnen, zuvor in handliche Zylinder zerschnittenen Teile bestimmt. Letztere Methode bedingt zusätzlich die experimentelle Bestimmung der jeweiligen Holzdichte, die entweder experimentell über das archimedische Prinzip oder basierend auf tabellarisch aufgelisteten Erfahrungswerten (z.B. aus der Global Wood Density Database; ZANNE ET AL., 2009) bestimmt werden kann. Dieser Ansatz liefert zwar im Allgemeinen hochgenaue Biomassedaten für Einzelbäume, ist aber arbeitsintensiv, teuer und nicht für die Analyse größerer Waldgebiete geeignet (BURT ET AL., 2021). Außerdem ist diese Methode irreversibel und kann daher ethische und rechtliche Fragen aufwerfen, vor allem in geschützten Wäldern.

In der Praxis wird daher häufig auf sogenannte allometrische Funktionen oder kurz Allometrien zurückgegriffen. Allometrien sind mathematische Beziehungen, die beschreiben, wie bestimmte biologische Merkmale eines Organismus (in unserem Fall eines Baumes) zueinanderstehen. Zu diesen Merkmalen können unter anderem Größe, Gewicht oder Form gehören. In der Forstwirtschaft werden allometrische Gleichungen häufig zur Schätzung von AGB oder Baumvolumen auf der Grundlage leicht messbarer Parameter wie Brusthöhendurchmesser (BHD) und Baumhöhe verwendet. Der BHD wird in der Regel mit einem Maßband oder einem Messschieber gemessen, während die Baumhöhe in der Regel mit Instrumenten wie einem Messschieber und Scheitelneigungsmesser bestimmt wird.

Allometrische Funktionen und deren Parameter werden in der Regel empirisch bestimmt (wiederum basierend auf Daten, die von destruktiven Messungen stammen). Der Großteil der AGB-beschreibenden Allometrien haben folgende Form (ZIANIS ET AL., 2005):

$$\text{Log}(M) = A + B \times \text{Log}(BHD)$$

Dabei steht M für die Biomasse und BHD für den Durchmesser in Brusthöhe. A und B sind die empirisch geschätzten Parameter, die diversen Tabellen entnommen werden können

(ZIANIS ET AL., 2005). Aufgrund der Diversität der physiologischen und metabolischen Eigenschaften von Bäumen und den variierenden klimatischen Bedingungen, sollten, sofern verfügbar, Spezies- und idealerweise auch Biom- bzw. Klimazonenspezifische Parameter für die Berechnung konkreter Einzelbaumwerte herangezogen werden. Eine bekannte globale Datenbank für allometrische Modelle und deren Parameter ist beispielsweise *GlobAllomeTree* (<https://globalallometree.org/>; HENRY ET AL., 2013).

1.3 Fernerkundung zur Erfassung von AGB

Terrestrisches Laserscanning (TLS) bietet eine praktikable, nicht-destruktive Alternative zu diesen Verfahren. Mittels TLS können detaillierte 3D-Punktwolken erzeugt werden, mit denen feinräumige Baumstrukturen erfasst werden, die zu Biomasseschätzungen verarbeitet werden können. In Kombination mit maßgeschneiderter Software für die Prozessierung dieser Punktwolken liefert TLS robuste Biomassedaten, die ähnliche genaue Ergebnisse liefern können wie destruktive Methoden (RAUMONEN ET AL., 2013).

In den letzten Jahrzehnten wurden erhebliche Fortschritte im Bereich des Waldmonitorings erzielt, insbesondere durch Fernerkundungstechnologien, die es ermöglichen, Waldökosysteme auf regionaler bis globaler Ebene zu beobachten. Das luftgestützte Laserscanning (Airborne Laser Scanning; ALS) sowie Unmanned Aerial Vehicle oder kurz UAV-basiertes Laser Scanning (UAV-LS), hat das Waldmonitoring weiter vorangetrieben. ALS und UAV-LS ermöglichen die Erfassung feinräumiger, dreidimensionaler Strukturdaten über größere Gebiete hinweg, mit nur geringfügig geringerer Genauigkeit im Vergleich zu in-situ-Messungen in Kombination mit allometrischen Modellen (BREDE ET AL., 2022).

Satellitengestützte optische und Radarsensoren bieten eine weitere Möglichkeit, AGB regional, kontinental oder sogar global in dichter zeitlicher Auflösung zu quantifizieren (z.B., NGUYEN ET AL., 2019). Optische Sensoren erfassen detaillierte spektrale Informationen, die dabei unterstützen können, Baumarten zu unterscheiden. Zudem ermöglichen sie durch die Analyse der Reflektanz des Kronendachs Rückschlüsse auf die Dichte, Gesundheit und Produktivität des Waldes. Diese Daten können anschließend mithilfe physiologischer oder empirischer Modelle in die Schätzung der AGB umgewandelt werden. Mikrowellen können im Gegensatz zu optischen Sensoren Baumkronen und Wolken durchdringen. Die Vegetation bzw. deren Wassergehalt dämpft dabei die von der Erdoberfläche emittierte oder reflektierte Mikrowellenstrahlung. Diese Dämpfung lässt sich durch eine Metrik, die als „Vegetationsoptische Dichte“ (engl. Vegetation Optical Depth; VOD) bezeichnet wird, quantifizieren (ZOTTA ET AL., 2024).

1.4 Das Potential der Hosentaschenphotogrammetrie

Fernerkundliche Methoden haben große Vorteile, allerdings bleibt es unabdingbar die gesammelten Daten weiter mit in-situ Referenzdaten zu kalibrieren und validieren. Im großen Stil lässt sich das nur mit allometrischen Schätzungen erreichen. Das Sammeln der dafür notwendigen Daten ist bislang exklusive Domäne geschulter Expertinnen. Dieser professionelle Ansatz gewährleistet zwar eine hohe Datenqualität und Robustheit, schränkt aber den geografischen und zeitlichen Umfang der Messungen erheblich ein.

Eine Möglichkeit diese Datenlücke zu schließen ist unter Einbindung der Bevölkerung im Rahmen von Citizen-Science-Kampagnen. Eine solche Initiative verfolgt neben der Verbesserung der Datengrundlage auch das Ziel, das Bewusstsein für unsere Wälder zu stärken und durch die Beteiligung an der Wissensbildung auch das zuletzt bröckelnde Vertrauen (IHS,

2023) in die Wissenschaft zu stärken. Konkret bedeutet dies Bürgerinnen einzuladen, sich an der Quantifizierung des Biomassebestandes unserer Wälder zu beteiligen. Obwohl die für diese nicht-destruktiven Messungen erforderliche Ausrüstung kostengünstig und leicht tragbar ist, wird sie in der Regel von der Allgemeinheit nicht besessen bzw. schon gar nicht im Alltag mitgeführt. Ein überwältigender Teil der österreichischen Bevölkerung trägt jedoch Smartphones bei sich. 2023 betrug der Anteil der Österreicherinnen über 15 Jahre, die ein Smartphone besitzen 89% (*KMU Forschung Austria, & Handelsverband Österreich, 2023*). Unter Berücksichtigung der Vielzahl an Sensoren (Kamera, GNSS, Gyroskop, Magnetometer, Accelerometer), die in solchen Smartphones verbaut sind, ergibt sich ein enormes Potential für die sogenannte „Hosentaschenphotogrammetrie“, die photogrammetrische Datenaufnahme und Auswertung für jedefrau zugänglich macht. Die folgenden Kapitel beleuchten bestehende Implementierungen und deren Anwendbarkeit für die Bestimmung von Baumparametern im Kontext von Citizen-Science.

2 Smartphone-Apps für BHD und Baumhöhenmessungen

Um zu beurteilen, inwieweit vorhandene Apps zur Messung des BHD und der Baumhöhe geeignet sind, wurden bestehende Implementierungen untersucht. Die Recherche konzentrierte sich dabei ausschließlich auf Android-basierte Apps, da Android mit etwa 71 % den größten Anteil am Smartphone-Markt besitzt (*STATCOUNTER, 2024*). Bei der Suche nach Apps wurde sowohl der offizielle Google Play Store als auch inoffizielle Distributionskanäle (z.B. APKPure; [APKpure.com](https://www.apkpure.com)) durchsucht, wobei bei letzteren Kanälen keine Apps gefunden wurden, die nicht ohnehin im Google Play Store verfügbar sind. Zusätzlich wurde relevante Literatur zum Thema gesammelt, und die Autorinnen passender Artikel, die Smartphone-basierte Lösungen zur Bestimmung von Baumparametern vorstellen, wurden direkt per E-Mail kontaktiert. Dadurch konnten zu den vier Apps aus dem PlayStore noch zwei zusätzliche Apps auf unserem Test-Smartphone installiert werden.

Die bekannten Apps *KATAM* und *TRESTIMA*, die ebenfalls in der Lage sind, Einzelbaumparameter zu erfassen, wurden in dieser Analyse nicht berücksichtigt. Diese Apps liefern in ihrer Basisversion lediglich über größere Flächen gemittelte Werte, wie etwa den durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser (BHD) aller gemessenen Bäume in einem Waldstück. Für die Erhebung von Einzelbaumdaten wären sowohl eine deutlich teurere Lizenz als auch der Kauf eines der offiziell unterstützten Smartphone-Geräte erforderlich gewesen, was neben den zusätzlichen Kosten auch nicht dem Ziel dieser Studie – der Analyse von Apps im Kontext von Citizen-Science – entsprochen hätte.

Tabelle 1: Übersicht über die untersuchten Android-Apps für die Bestimmung der Baumparameter Baumhöhe und BHD.

Name	Kosten	Baumparameter	Im PlayStore	Referenz
GlobeObserver	Kostenlos	Baumhöhe	Ja	CAMPBELL (2021)
Arboreal	11.99\$	Baumhöhe	Ja	www.arboreal.se
ARTreeWatch	Kostenlos	Baumhöhe, BHD	Nein	WU ET AL. (2023)

WorkingTrees	Kostenlos	Baumhöhe, BHD	Ja	AHAMED ET AL. (2023)
Geo-Quest	Kostenlos	Baumhöhe, BHD	Ja	www.iiasa.ac.at/projects/c4c
GreenLens	Kostenlos	BHD	Nein	FENG ET AL. (2024)

Der Großteil der getesteten Apps stützt die räumliche Modellierung auf Googles ARCore-Modul. ARCore verwendet eine Technik namens SLAM (Engl.: Simultaneous Localization and Mapping), um die Position des Telefons in Bezug auf seine Umgebung während der Bewegung zu bestimmen. Es identifiziert markante visuelle Merkmale im aufgenommenen Bild der Kamera ("Feature Points"), und verfolgt diese, um die Bewegung des Geräts zu schätzen. Diese visuellen Daten werden mit den Inertialmessungen des IMU des Geräts kombiniert, um die Position und Orientierung der Kamera im Laufe der Zeit zu berechnen. Gleichzeitig lassen sich dadurch Tiefenkarten erstellen, also Bilder, die Daten über die Entfernung zwischen Smartphone-Kamera und Objekten in deren Sichtfeld enthalten. Diese Tiefenkarten nutzen die meisten Apps als Grundlage für die Ableitung von BHD und Höhenmessung (z.B. FENG ET AL., 2024).

2.2 Testgebiet, Referenzdaten und Aufnahmeprotokoll

Das Testgebiet befindet sich im Prater, einem Erholungsgebiet in Wien. Der für diese Studie ausgewählte Bereich im Prater ist ein bewaldetes Gebiet von etwa 3600 m² mit wenig Unterholz (siehe Abb. 1).

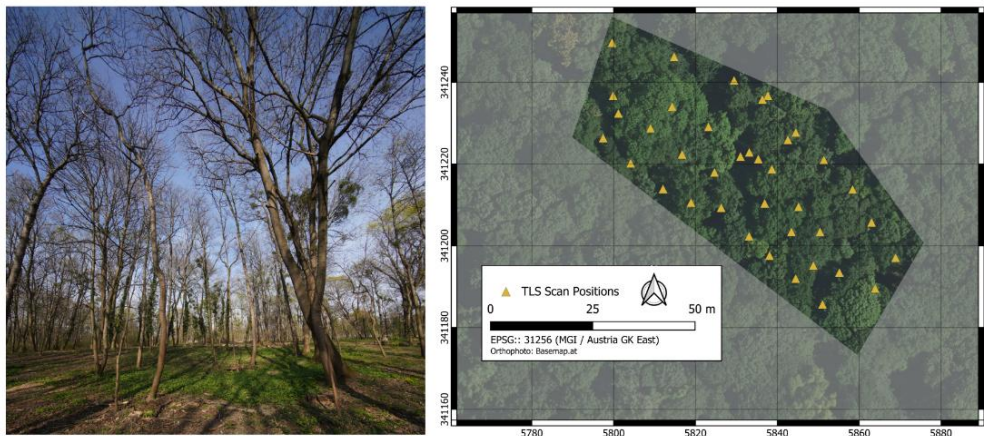


Abb 1: Überblicksfoto des Testwaldes im Prater vom 21.3.2024 (links) und eine Karte des Testgebiets mit den Standpunkten für die TLS Messungen.

Das Gebiet wurde zunächst systematisch mittels TLS aufgenommen. Für die TLS-Kampagne wurde ein RIEGL VZ-600i Scanner eingesetzt. Der Scanner weist eine Strahldivergenz von 3,5 mrad auf, was bedeutet, dass der Strahldurchmesser über eine Distanz von 100 Metern um 3,5 cm zunimmt. Die dokumentierte 3D-Positionsgenauigkeit des Geräts beträgt 3 mm bei 50 Metern und 5 mm bei 100 Metern. Die Scans wurden mit einer Pulswiederholrate von

2200 kHz und einem Winkelabstand von $0,034^\circ$ durchgeführt. Die Datenerfassung fand im frühen Frühling kurz vor dem Laubaustrieb statt, bei wenig bis keinem Wind.

Die aus den Daten generierte Punktwolke dient als Grundlage für die Baumhöhenmessungen, die manuell mittels der Software CloudCompare (<https://www.danielgm.net/cc/>) durchgeführt wurden. Die BHD-Messungen erfolgten ebenfalls mithilfe eines Maßbands.

Die Appmessungen wurden an zwei Tagen im Frühling 2024 durchgeführt. Dabei wurden nur Bäume berücksichtigt, deren Baumkrone nicht oder kaum mit denen benachbarter Bäume überlappt, um Mehrdeutigkeiten in der Messgenauigkeit weitgehend zu vermeiden. Zudem wurde eine Messung bei offensichtlich falschen Ergebnissen oder bei Abbruch der Messung bis zu einem Maximum von drei Mal wiederholt. Als Testsmartphone für die Messung wurde das Model Samsung Galaxy M34 5G verwendet. Dieses Smartphone wurde aufgrund der hohen Verbreitung dieses und ähnlicher Modelle in der Bevölkerung ausgewählt. Es verfügt über alle unbedingt notwendigen Sensoren (Kamera, GNSS, Gyroskop, Magnetometer, Accelerometer) und die notwendige Prozessorleistung, um das ARCore-Modul auszuführen. Mit einem Kaufpreis von knapp unter 300€ zählt es zu einem repräsentativen Mittelklassemodell.

3 Ergebnisse und Diskussion

Bei der Nutzung der Apps im Feld wurde festgestellt, dass die Messungen insgesamt zeitintensiv sind. Dies wird auch durch die Zeitdokumentation (siehe Abb. 2) bestätigt. Ein wesentlicher Faktor, der die Messdauer beeinflusst, ist die Initialisierungsphase, in der die Apps ein räumliches Modell aufbauen müssen, das für jede Messung erneut erstellt wird. Zudem kam es häufig vor, dass Messungen mindestens einmal wiederholt werden mussten, da die Ergebnisse beim ersten Versuch entweder eindeutig fehlerhaft oder gar nicht vorhanden waren. Ein weiterer Faktor, der die Messdauer beeinflusst, ist die durchschnittliche Messdauer pro Baum, die je nach App zwischen 90 und etwa 150 Sekunden variiert.

Hinsichtlich des Energieverbrauchs zeigen vier der sechs Apps einen vergleichbaren Verbrauch (siehe Abb. 2), wobei *ARTreeWatch* und *GLOBEObserver* als deutliche Ausreißer nach oben bzw. unten auffallen.

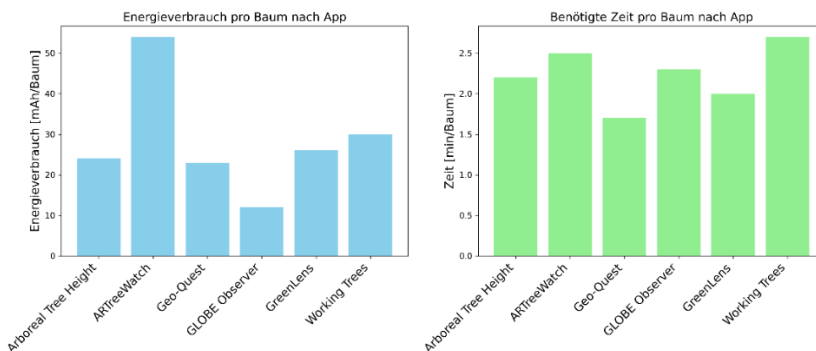


Abb 2: Analyse des Energieverbrauchs (links) und des benötigten Zeitaufwands (rechts) der

getesteten Apps. Zu beachten gilt, dass mit drei Apps (siehe Tabelle 1) beide Parameter gemessen wurden, während mit den anderen drei lediglich BHD oder Baumhöhe gemessen wurde.

3.1 Auswertung der BHD- und Höhenmessungen

Bezüglich der BHD-Messungen (Abb. 3) zeigen die vier getesteten Apps mittlere quadratische Abweichungen (Root Mean Square Error, RMSE) zwischen 1,2 cm und 3,3 cm. Während *GreenLens* und *WorkingTrees* den BHD systematisch über- bzw. unterschätzen, zeigen *Geo-Quest* und *ARTreeWatch* vernachlässigbare systematische Abweichungen (Bias) zu den Referenzmessungen.

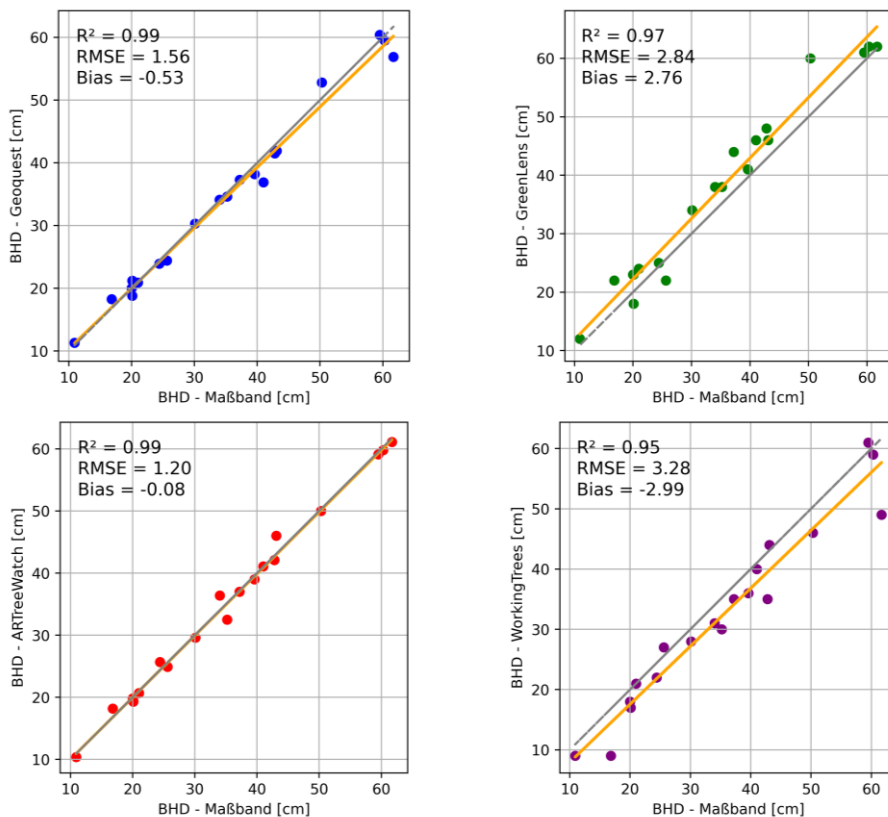


Abb 3: Streudiagramm der vier getesteten Apps zur Bestimmung des BHD. Die orangen Linien zeigen die jeweiligen linearen Regressionsgeraden und die graue, durchgezogene Linie symbolisiert die 1:1 Referenzlinie.

Die Höhenmessungen weisen im Allgemeinen höhere Abweichungen von den Referenzmessungen auf (Abb. 4). Während der Determinationskoeffizient (R^2) für die BHD-Messungen nahe 1,0 liegt, weisen die Baumhöhenmessungen einen durchschnittlichen Wert von 0,56 auf. Die Standardfehler unterscheiden sich zwischen den Apps nur geringfügig, und alle Apps zeigen eine kleine bis moderate systematische Überschätzung, die positiv mit der Baumhöhe korreliert. Auffällig bei den Baumhöhenmessungen ist zudem, dass die Messabweichungen

der Apps stark korrelieren. Das deutet darauf hin, dass die genaue Umsetzung des Messvorgangs in der App wenig Einfluss auf die Messgenauigkeit hat, welche vielmehr von der häufig schwer eindeutig definierbaren Baumspitze beeinflusst wird. So erreicht die App *GlobeObserver* beispielsweise ähnliche Ergebnisse wie die anderen Apps, trotz ihrer im Vergleich einfachen Implementierung: Die Nutzerin zählt die Schritte vom Baumstamm bis zu dem Punkt, an dem sie die Baumkrone sehen kann, und misst mit dem Handy lediglich den Winkel zwischen Baumbasis und Baumspitze. Die anderen Apps messen diese Distanz kontinuierlich mittels SLAM, was in Anbetracht der erzielten Ergebnisse als Over-Engineering bezeichnet werden könnte. Diese sehr Prozessor-intensive Art der räumlichen Modellierung erklärt auch den weitaus höheren Energieverbrauch dieser Apps im Vergleich zu *GlobeObserver*.

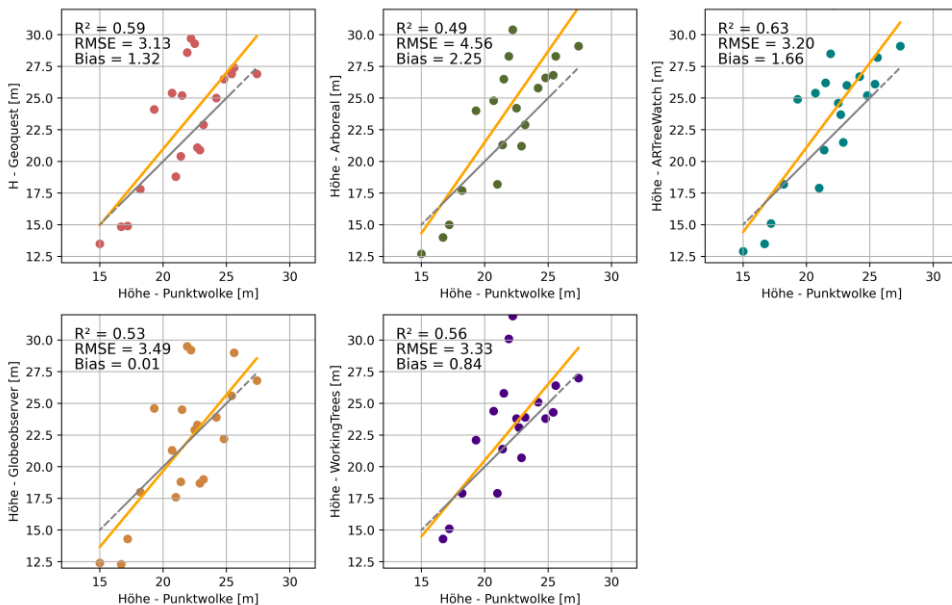


Abb. 4: Streudiagramm der fünf getesteten Apps zur Bestimmung der Baumhöhe. Die orangenen Linien zeigen die jeweiligen linearen Regressionsgeraden und die graue Linie symbolisiert die 1:1 Referenzlinie

4 Fazit und Ausblick

Grundsätzlich bieten alle getesteten Apps die Möglichkeit, die wesentlichen Baumparameter BHD und Höhe mit einer hohen Genauigkeit zu messen. In Anbetracht der weiten Verbreitung von Smartphones ergibt sich damit ein großes Potenzial für die Quantifizierung der AGB. Allerdings wurden im Rahmen dieser Arbeit auch einzelne Defizite identifiziert.

Neben der oftmals wenig intuitiven Gestaltung der App, die in diesem Beitrag aus Platzgründen nicht näher beleuchtet wurde, ist ein wesentlicher Nachteil der getesteten Apps die zeitintensive Messung. Der BHD-Messprozess dauert beispielsweise mit dem Smartphone um ein Vielfaches länger als mit dem Maßband. Gleichzeitig erlauben die Apps jedoch eine ef-

fizientere und schnellere Protokollierung der Daten. In Bezug auf Citizen-Science-Anwendungen bieten diese Apps jedoch insgesamt großes Potenzial, da sie eine niederschwellige und bei richtiger Implementierung sogar spielerische und lehrreiche Erforschung des Waldes ermöglichen.

5 Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des Projekts „Citizens for Copernicus (C4C): Combing Copernicus and Crowdsourced Data for Forest Resources Monitoring“, gefördert von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen der Ausschreibung ASAP 2022, Antrags-ID: 47907528.Literatur

AHAMED, A., FOYE, J., POUDEL, S., TRIESCHMAN, E., & FIKE, J. (2023). Measuring tree diameter with photogrammetry using mobile phone cameras. *Forests*, 14(10), 2027. <https://doi.org/10.3390/f14102027>

AVITABILE, V., HEROLD, M., HEUVELINK, G. B. M., LEWIS, S. L., PHILLIPS, O. L., ASNER, G. P., ARMSTON, J., ASHTON, P., BANIN, L., BAYOL, N., BERRY, N., BOECKX, P., DE JONG, B., DEVRIES, B., GIRARDIN, C., KEARSLEY, E., LINDSELL, J. A., LOPEZ-GONZALEZ, G., LUCAS, R., WILLCOCK, S. (2016). An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global Change Biology*, 22(4), 1406–1420. <https://doi.org/10.1111/gcb.13139>

BREDE, B., TERRY, L., BARBIER, N., BARTHOLOMEUS, H. M., BARTOLO, R., CALDERS, K., DERROIRE, G., KRISHNA MOORTHY, S. M., LAU, A., LEVICK, S. R., RAUMONEN, P., VERBEECK, H., WANG, D., WHITESIDE, T., VAN DER ZEE, J., & HEROLD, M. (2022). Non-destructive estimation of individual tree biomass: Allometric models, terrestrial and UAV laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113180. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113180>

BURT, A., VICARI, M. B., DA COSTA, A. C. L., COUGHLIN, I., MEIR, P., ROWLAND, L., & DISNEY, M. (2021). New insights into large tropical tree mass and structure from direct harvest and terrestrial lidar. *Royal Society Open Science*, 8(2), 201458. <https://doi.org/10.1098/rsos.201458>

CAMPBELL, B. A. (2021). ICESat-2 and the Trees Around the GLOBE student research campaign: Looking at Earth's tree height, one tree at a time. *Acta Astronautica*, 182, 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.02.002>

FENG, Z., XIE, M., HOLCOMB, A., & KESHAV, S. (2024). An app for tree trunk diameter estimation from coarse optical depth maps. *Ecological Informatics*, 82, 102774. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102774>

HENRY M, BOMBELLI A, TROTTA C, ALESSANDRINI A, BIRIGAZZI L, SOLA G, VIEILLEDENT G, SANTENOISE P, LONGUETAUD F, VALENTINI R, PICARD N, SAINT-ANDRÉ L (2013). GlobAllomeTree: international platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. *iForest* 6: 326-330. DOI: 10.3832/ifer0901-006

HOUGHTON, R. A., HALL, F., & GOETZ, S. J. (2009). Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(G2), 0–03. <https://doi.org/10.1029/2009JG000935>

INSTITUT FÜR HÖHERE STUDIEN (IHS). (2023). Ursachenstudie zu Ambivalenzen und Skepsis in Österreich in Bezug auf Wissenschaft und Demokratie: Endbericht. Institut für Höhere Studien. <https://irihs.ihs.ac.at/id/eprint/6648>

KMU FORSCHUNG AUSTRIA, & HANDELSVERBAND ÖSTERREICH. (2023). Anteil der Smartphone-Besitzer sowie Nutzung von Mobile Commerce in Österreich von 2013 bis 2023 [Graph]. In *Statista*. Zugriff am 31. Oktober 2024, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/568185/umfrage/smartphone-besitz-und-smartphone-nutzung-in-oesterreich/>

SIRY, J. P., CUBBAGE, F. W., & AHMED, M. R. (2005). Sustainable forest management: Global trends and opportunities. *Forest Policy and Economics*, 7(4), 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2003.09.003>

STATCOUNTER. (2024). Marktanteile der führenden mobilen Betriebssysteme an der Internetnutzung mit Mobiltelefonen weltweit von Januar 2011 bis Juli 2024 [Graph]. In *Statista*. Zugriff am 31. Oktober 2024, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/184335/umfrage/marktanteil-der-mobilen-betriebssysteme-weltweit-seit-2009/>

NGUYEN, T. H., JONES, S., SOTO-BERELOV, M., HAYWOOD, A., & HISLOP, S. (2019). Landsat time-series for estimating forest aboveground biomass and its dynamics across space and time: A review. *Remote Sensing*, 12(1), 98. <https://doi.org/10.3390/rs12010098>

WU, F., WU, B., & ZHAO, D. (2023). Real-time measurement of individual tree structure parameters based on augmented reality in an urban environment. *Ecological Informatics*, 77, 102207. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102207>

ZIANIS, D., MUUKKONEN, P., MÄKIPÄÄ, R., & MENCUCCINI, M. (2005). Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*, 4, 63. <https://doi.org/10.14214/sf.sfm4>

ZANNE, A. E., LOPEZ-GONZALEZ, G., COOMES, D. A., ILIC, J., JANSEN, S., LEWIS, S. L., MILLER, R. B., SWENSON, N. G., WIEMANN, M. C., & CHAVE, J. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Dryad Digital Repository*. Available online: <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>

ZOTTA, R.-M., MOESINGER, L., VAN DER SCHALIE, R., VREUGDENHIL, M., PREIMESBERGER, W., FREDERIKSE, T., DE JEU, R., & DORIGO, W. (2024). VODCA v2: Multi-sensor, multi-frequency vegetation optical depth data for long-term canopy dynamics and biomass monitoring. *Earth System Science Data*, 16, 4573–4617. <https://doi.org/10.5194/essd-16-4573-2024>