

Sensorgestützte Erfassung der Eigenschaften landwirtschaftlich genutzter Böden anhand von Aufnahmen des Bodenprofils

UWE KNAUER¹, JANINE KOPKA¹ & PAUL HERZIG¹

Zusammenfassung: Der Beitrag ist der 3D-Rekonstruktion eines Bodenprofils am Standort Bernburg Strenzfeld als Proof-of-Concept für den Aufbau eines digitalen Archivs und digitalen Zwillings für das Versuchswesen gewidmet. Vorgestellt werden Kombinationsmöglichkeiten mit der geoelektrischen Erfassung von Bodenzonen mittels Topsoil Mapper und bildgebender Spektroskopie mit SPECIM IQ.

1 Einleitung

Eine möglichst genaue Kenntnis des Bodens und seiner Eigenschaften bilden die Grundlage einer standortangepassten und nachhaltigen Landnutzung (LEBERT 2006). Am ausgehobenen Bodenprofil (Abb. 3) lassen sich Aufbau und Eigenschaften des Erdbodens anhand einer Feldgefügeansprache gut erfassen. Durch den hohen Aufwand und den mit dem Aushub verbundenen Eingriff in die Bodenstruktur ist dies nur punktuell möglich. In diesem Beitrag wird dargestellt, wie die jährlich zu Unterrichtszwecken ausgehobenen Bodenprofile der Hochschule Anhalt digital erfasst sowie für weitere Analysen der Bodenstruktur aufbereitet und genutzt werden können.

2 Erfassung und Modellierung des Bodens

In diesem Abschnitt wird auf drei Technologien und ihr Zusammenspiel eingegangen, die zur digitalen Erfassung und Charakterisierung von Bodeneigenschaften geeignet sind und im Feldversuchswesen der Hochschule Anhalt eingesetzt werden. Abschnitt 2.1 stellt die photogrammetrische Erfassung des Bodenprofils mit einer hochauflösenden RGB-Kamera dar. Diese Erfassung bildet die Grundlage der 3D-Modellierung. Abschnitt 2.2 stellt die flächenhafte Erfassung und Abgrenzung von Bodenzonen in einer Übersichtskarte anhand von Leitfähigkeitsmessungen vor. Abschnitt 2.3 beschreibt den Einsatz einer mobilen Hyperspektralkamera als Ergänzung der RGB-Kamera zur spektralen Charakterisierung des Bodenaufbaus.

2.1 Aufnahme und 3D-Rekonstruktion eines Bodenprofils

Den ersten Schritt stellt die Fotodokumentation mit dem Ziel der späteren dreidimensionalen Rekonstruktion des Bodenprofils dar. Hierfür kam eine Sony Alpha 7 III mit einem 50 mm Festbrennweitenobjektiv zum Einsatz (CRAMER 2017). Zur späteren maßstabsgerechten Rekonstruktion wurde ein Gliedermaßstab in der Szene platziert (Abb. 3).

Die photogrammetrische Rekonstruktion anhand von 310 Einzelaufnahmen erfolgte mit der Software Pix4Dmapper (JARASHIZADEH 2024). Abb. 1 zeigt die von der Software ermittelten

¹ Hochschule Anhalt, Fachbereich Landwirtschaft, Ökotrophologie und Landschaftsentwicklung, Strenzfelder Allee 28, D-06406 Bernburg, E-Mail: [uwe.knauer, janine.kopka, paul.herzig]@hs-anhalt.de

Aufnahmepositionen und Blickwinkel der Kamera. Innerhalb des Bildverbands ergaben sich annähernd 10,5 Mio. 2D-Punkte für das Matching. Im Mittel wurden pro Bild 34.724 Punkte von 75.448 Punkten verwendet. Das Bodenprofil stellt damit eine ausreichend strukturierte Szene für die 3D-Rekonstruktion dar. Für den Bündelblockausgleich (GRANSHAW 1980) wurden insgesamt etwa 3,46 Mio. 3D-Punkte verwendet. Der geschätzte mittlere Projektionsfehler beträgt nach dem Bündelblockausgleich 0,2 Pixel.

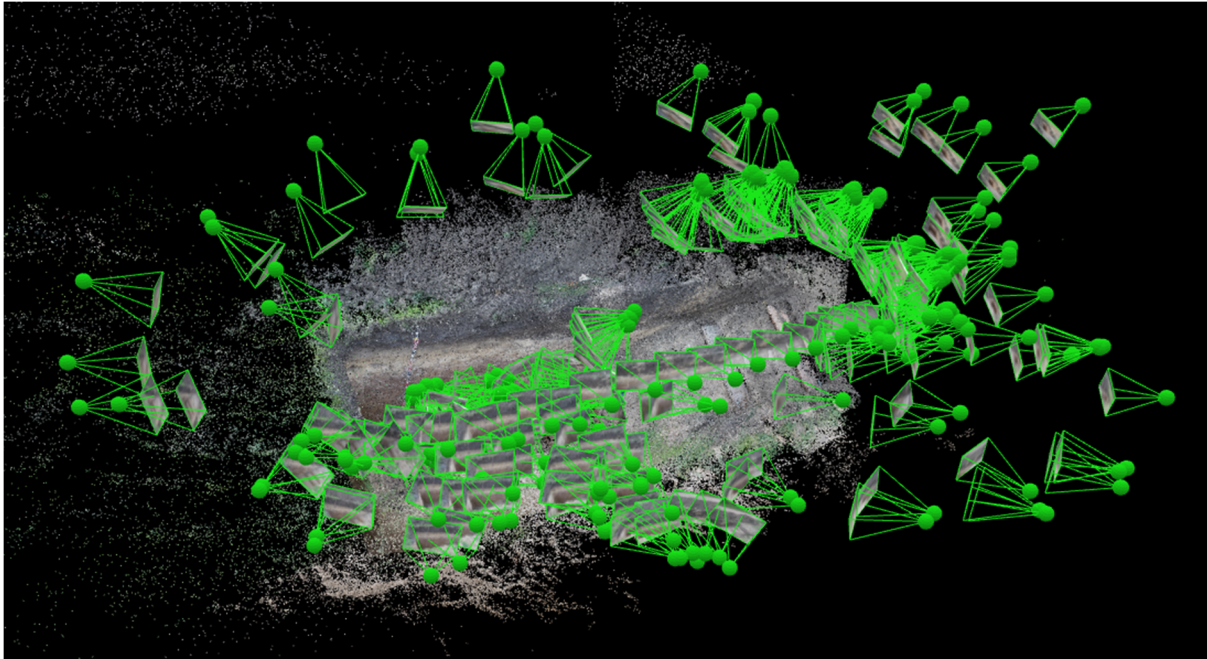


Abb. 1: Rekonstruktion der Aufnahmepositionen

Tab. 1 zeigt die Kameraparameter vor und nach der Optimierung beim Bündelblockausgleich. Die Kameraparameter wurden ohne Verwendung von Kontrollpunkten oder eines Kalibrierkörpers anhand der Geländeaufnahmen durch die Software Pix4Dmapper erstellt. Anpassungen der inneren Orientierung wurden bei der Lage des Bildhauptpunkts und Parametern zur Korrektur der radialen Verzeichnung R_1 bis R_3 vorgenommen. Das verwendete Objektiv musste nicht bzgl. einer tangentialen Verzeichnung korrigiert werden.

Tab. 1: Innere Orientierung der Kamera vor und nach Bündelblockausgleich

	Brennweite	Bildhauptpunkt x-Koordinate	Bildhauptpunkt y-Koordinate	R_1	R_2	R_3	T_1	T_2
Startwerte	50 mm	3000 [px]	2000 [px]	0	0	0	0	0
Optimierte Werte	51,008 mm	3006,416 [px]	2006,009 [px]	-0,018	-0,045	-0,189	0	0
Standard- abweichung	0,002 mm	0,457 [px]	0,483 [px]	0	0,004	0,018	0	0
		0,003 mm	0,003 mm					

Die hohe Zahl von Einzelaufnahmen und die daraus resultierende hohe Überlappung der Aufnahmebereiche ebenso wie die strukturreiche Szenerie bieten gute Voraussetzungen für den Bündelblockausgleich. Im Mittel standen 75.478 geeignete Punkte pro Bild zur Verfügung, von denen im Mittel 34.724 in mindestens einem weiteren Bild gefunden und zugeordnet

werden konnten. Das Diagramm in Abb. 2 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Matchings, d.h. die Häufigkeit mit der korrespondierende Punkte (Keypoints) in mehreren Bildern automatisch detektiert und einander zugeordnet werden konnten. Der überwiegende Anteil wird in 2 bis 3 Bildern detektiert.

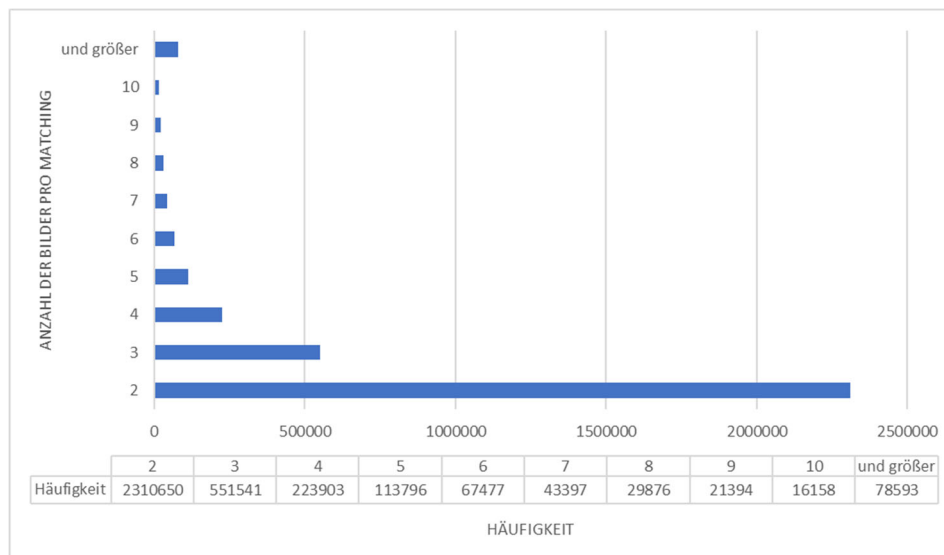


Abb. 2: Sichtbarkeit korrespondierender Punkte in 2 oder mehr Bildern als Grundlage der 3D-Rekonstruktion

Es konnte für den Bildverband eine dichte 3D-Punktwolke ermittelt werden. Anhand der 3D-Punktwolke wird die Oberfläche mit einem 3D-Mesh rekonstruiert. Abb. 3 gibt einen Eindruck von der erzielten Qualität des 3D-Modells.



Abb. 3 Rekonstruktion des Bodenprofils mit Darstellung des verwendeten Maßstabes

Das 3D-Modell wird im Wavefront OBJ-Format exportiert (MCHENRY 2008) und bildet die Grundlage eines digitalen Zwillings des Bodens. Im Vordergrund steht die Visualisierung der Bodenstruktur mit der Möglichkeit, weitere Eigenschaften des Bodens zu visualisieren (z.B. als Overlay) und punktuell Eigenschaften anderer Sensordaten durch Kenntnis des Bodenprofils zu erklären.

2.2 Kartierung von Bodenzonen mit dem Topsoil Mapper

Das Ausheben eines Bodenprofils dient in erster Linie der bodenkundlichen Ausbildung und liefert punktuell sehr detaillierte Informationen über die Beschaffenheit des Bodens. Daher dient die 3D-Rekonstruktion in erster Linie der Visualisierung und Archivierung. Daten ähnlicher Aussagekraft können jedoch durch Rammkernsondierung oder mittels Bohrstock erhoben und durch Laboruntersuchungen begleitet werden (JACOBS 2018). Diese stellen einen weniger gravierenden Eingriff in das Bodengefüge dar. Diesen punktuellen Herangehensweisen stehen verschiedene Verfahren zur flächenhaften Erfassung von Informationen zum Aufbau des Bodens und seiner Eigenschaften gegenüber (MOLIN 2019). Ein dafür zur Verfügung stehendes geoelektrisches Verfahren ist die Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit mit dem Topsoil Mapper der Fa. Geoprospectors (TSM). Genutzt wird dabei das Prinzip der elektromagnetischen Induktion. Änderungen des durch eine Sendespule im Boden induzierten elektromagnetischen Sekundärfelds können durch Empfängerspulen aufgezeichnet und lassen Rückschlüsse auf Änderungen der Bodeneigenschaften, wie Lagerungsdichte, Tongehalt und Wasserspeichervermögen zu (HEIL 2017). Die Interpretation der Messergebnisse stellt jedoch eine besondere Herausforderung dar, da verschiedene Faktoren zu Änderungen der Leitfähigkeit führen oder beitragen können. Aussagekraft gewinnen die Ergebnisse erst durch weitere Beprobung und Analyse der festgestellten Unterschiede.



Abb. 4 Messfahrzeug Toyota Hilux mit auf Anhängerkupplung montiertem Topsoil Mapper

Abb. 4 zeigt den TSM am Messfahrzeug montiert. Die Steuerung des Messvorgangs erfolgt über ein Bedienterminal, das über das Bordspannungsnetz des Fahrzeugs mit Energie versorgt wird. Die Montage des TSM an Traktoren ist über die standardisierte Dreipunktaufhängung ebenfalls im Front- oder Heckanbau möglich.

Das Ergebnis einer Messfahrt zur Kartierung des Versuchsfelds Strenzfeld 1 (~27 ha) vom 28.7.2022 und die ermittelten fünf Zonen unterschiedlicher Leitfähigkeit des Bodens von niedriger (blau) bis hoher (rot) Leitfähigkeit zeigt Abb. 5. Die dargestellte Auswertung basiert auf Leitfähigkeitsmessungen mit vier Empfängerspulen und berücksichtigt damit Änderungen der Leitfähigkeit in vier Bodenschichten. Das Bodenprofil, dessen Rekonstruktion in Abschnitt 2.1 beschrieben wurde, befindet sich in einer Zone mit hoher Leitfähigkeit (orange). Die Georeferenzierung des Bodenprofils erlaubt Rückschlüsse auf die Bodenstruktur in den Bereichen mit vergleichbarer Leitfähigkeit und minimiert den Aufwand bei der Probennahme. Ebenso kann anhand der Leitfähigkeitszonen eine gezielte Sondierung geplant werden, um Unterschiede aufzuklären.

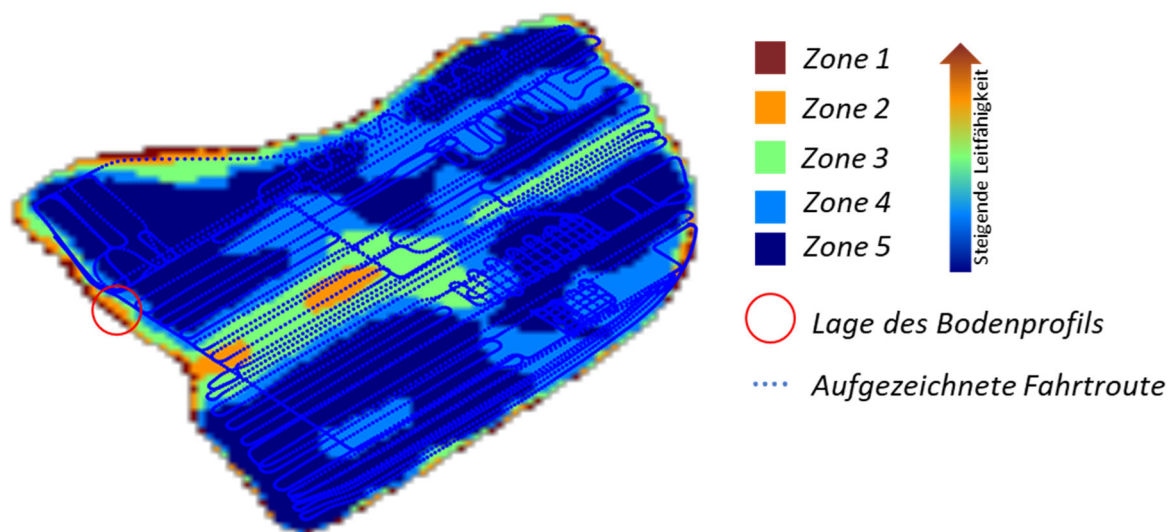


Abb. 5 Kartierung von Bodenzonen anhand von Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit

3 Hyperspektrale Aufnahme des Bodenprofils

Die bodenkundliche Ansprache und Auswertung des Bodenprofils sind komplex und beinhalten nicht nur die visuelle, sondern auch eine taktile, olfaktorische und teilweise geschmackliche Bewertung. Um der Komplexität dieses Ansatzes ansatzweise gerecht zu werden, ist eine Auswertung im RGB-Messbild oder 3D-Modell unzureichend.

Deshalb wurde das Bodenprofil zusätzlich mit einer Hyperspektralkamera SPECIM IQ (BEHMANN 2018) im Bereich VIS-NIR vermessen. Das Hyperspektralbild hat 204 Kanäle im Bereich von 400 nm bis 1000 nm. Gegenüber dem 3D-Modell mit RGB-Texturen lässt die spektrale Erfassung der Bodeneigenschaften eine bessere Differenzierung und nachgelagerte Vermessung der Bodenstruktur erwarten. Zur spektralen Vermessung wurde ein Weißreferenztableau in die Szene eingebracht und die Stirnseite des Bodenprofils aufgenommen. Die Weißreferenz dient der radiometrischen Kalibrierung der Daten und der Bestimmung der wellenlängenabhängigen Reflektion des Lichts am Bodenprofil.

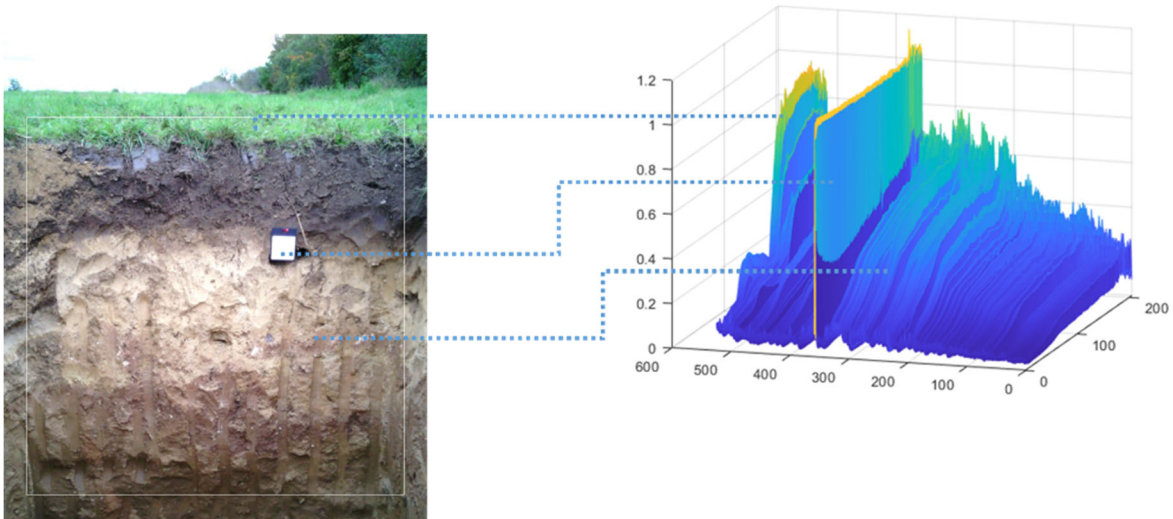


Abb. 6: Aufnahmebereich der Hyperspektralkamera SPECIM-IQ und Visualisierung der aufgenommenen Spektren nach der radiometrischen Korrektur sowie der Umrechnung auf den Reflektionsgrad

Abb. 6 zeigt den Aufnahmebereich der Hyperspektralkamera im RGB-Bild, die in die Szene eingebrachte Weißreferenz sowie die Spektren. Von links nach rechts sind typische spektrale Reflektionsmuster der Vegetation, der Weißreferenz und der Bodenschichten erkennbar. Als erster Schritt ist eine Erkennung von Zonen mit ähnlichen Spektren zweckmäßig. Daraus können unmittelbar Informationen zur Mächtigkeit einzelner Bodenhorizonte und die Lage der Übergangsbereiche abgeleitet werden. Nachgelagert kann zonenspezifisch eine Analyse hinsichtlich der Zusammensetzung erfolgen.

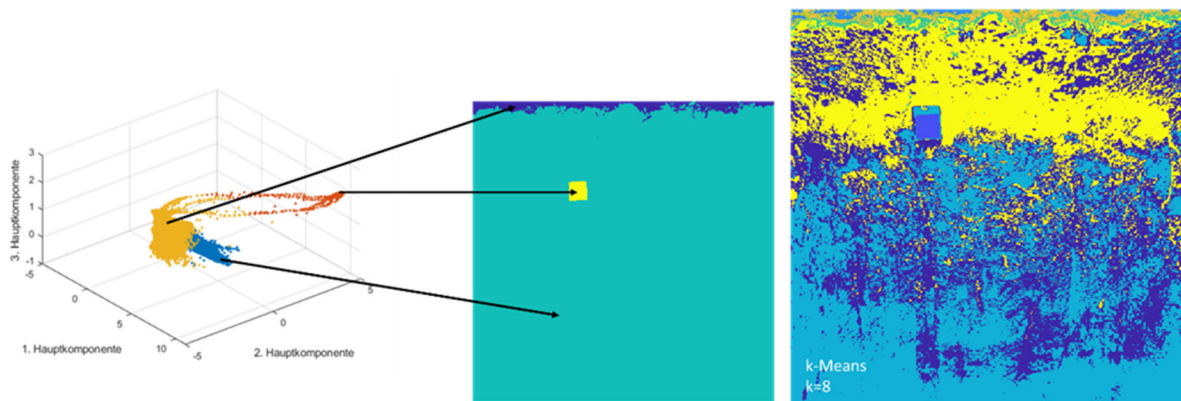


Abb. 7: Darstellung der ersten drei Hauptkomponenten der spektralen Signaturen (links), Darstellung einer Zonenerkennung mit k-Means (k=3, Mitte) und einer stärker differenzierenden Zonierung mit k-Means (k=8, rechts)

Abb. 7 zeigt die Projektion der einzelnen Spektren in einen dreidimensionalen Merkmalsraum. Der Merkmalsraum wird durch die drei ersten, mittels Karhunen-Lóeve-Transformation (PCA) ermittelten, Hauptkomponenten (principal components) gebildet. Es zeigt sich eine gute Korrespondenz zwischen dem Ergebnis der Clusteranalyse mit dem k-Means-Algorithmus (k=3, mittleres Bild) und der Differenzierung der Punktwolke im Merkmalsraum. Eine

Clusteranalyse mit k-Means ($k=8$) zeigt die Fähigkeit zur guten Differenzierung der Bodenstrukturen anhand der dimensionsreduzierten spektralen Signatur.

Die aus dem Spektralbild ableitbaren bodenkundlichen Informationen sind Gegenstand weiterer Arbeiten. Die Erweiterung des 3D-Modells mit diesen sowie weiteren Informationen bildet den Kern künftiger Arbeiten, um den digitalen Zwilling der Versuchsfelder der Hochschule Anhalt um die Komponente der Bodenstruktur zu erweitern. Die Integration und Kombination von Sensordaten, die den aktuellen Zustand erfassen und den Zustand des digitalen Zwillings fortschreiben können, stellt dabei eine zentrale Komponente dar. In diesem Beitrag wurden Möglichkeiten, die im Rahmen der aktuellen Arbeiten genutzt werden, vorgestellt und ihr Zusammenspiel bei der Erfassung und Rekonstruktion der realen Verhältnisse skizziert.

4 Danksagung

Die Förderung des Vorhabens erfolgt teilweise aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt (bzw. erfolgte) über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen der Bekanntmachung über die Förderung der Einrichtung von Experimentierfeldern als Zukunftsbetriebe und Zukunftsregionen der Digitalisierung in der Landwirtschaft sowie in vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsketten mit dem Förderkennzeichen 28DE205A21.

5 Literaturverzeichnis

- BEHMANN, J., ACEBRON, K., EMIN, D., BENNERTZ, S., MATSUBARA, S., THOMAS, S., BOHNENKAMP, D., KUSKA, M. T., JUSSILA, J., SALO, H., MAHLEIN, A.-K. & RASCHER, U., 2018: Specim IQ: Evaluation of a New, Miniaturized Handheld Hyperspectral Camera and Its Application for Plant Phenotyping and Disease Detection, *Sensor* **18**(2), 441, <https://doi.org/10.3390/s18020441>.
- CRAMER, M., PRZYBILLA, H.-J. & ZURHORST, A., 2017: UAV Cameras: Overview and Geometric Calibration Benchmark, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLII-2/W6**, 85-92, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017>.
- GRANSHAW, S. I., 1980: Bundle Adjustment Methods in Engineering Photogrammetry, *Int. Arch. Photogramm. Photogrammetric Record*, **10**(56), 181-207, <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1980.tb00020.x>.
- HEIL, K. & SCHMIDHALTER, U., 2017: The Application of EM38: Determination of Soil Parameters, Selection of Soil Sampling Points and Use in Agriculture and Archaeology, *Sensors*, **17**(11), 2540, <https://doi.org/10.3390/s17112540>.
- JACOBS, A., FLESSA, H., DON, A., HEIDKAMP, A., PRIETZ, R., DECHOW, R., GENSIOR, A., POEPLAU, C., RIGGERS, C., SCHNEIDER, F., TIEMEYER, B., VOS, C., WITTNEBEL, M., MÜLLER, T., SÄURICH, A., FAHRION-NITSCHKE, A., GEBBERT, S., HOPFSTOCK, R., JACONI, A., KOLATA, H., LORBEER, M., LAGGNER, J., WEISER, A. & FREIBAUER, A., 2018: Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung, *Thünen Report*, **64**, <https://doi.org/10.3220/REP1542818391000>.

- JARASHIZADEH, S. & SALEHI, B., 2024: A Comparative Analysis of UAV Photogrammetric Software Performance for Forest 3D Modeling: A Case Study Using AgiSoft Photoscan, PIX4DMapper, and DJI Terra, *Sensors*, **24**(1), 286, <https://doi.org/10.3390/s24010286>.
- LEBERT, M., BRUNOTTE, J., SOMMER, C. & BÖKEN, H., 2006: Bodengefüge gegen Verdichtungen schützen – Lösungsansätze für den Schutz landwirtschaftlich genutzter Böden, *Plant Nutrition and Soil Science*, **169**(5), 633-641, <https://doi.org/10.1002/jpln.200521762>.
- MCHENRY, K. & BAJCSY, P., 2008: An overview of 3d data content, file formats and viewers, *National Center for Supercomputing Applications*, **1205**, 22, <https://isda.ncsa.illinois.edu/peter/publications/techreports/2008/NCSA-ISDA-2008-002.pdf>, letzter Zugriff 30.01.24.
- MOLIN, J. & TAVARES, T.R., 2019: Sensor Systems for Mapping Soil Fertility Attributes: Challenges, Advances, and Perspectives in Brazilian Tropical Soils, *Eng. agric.*, **39**, <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39nep126-147/2019>.