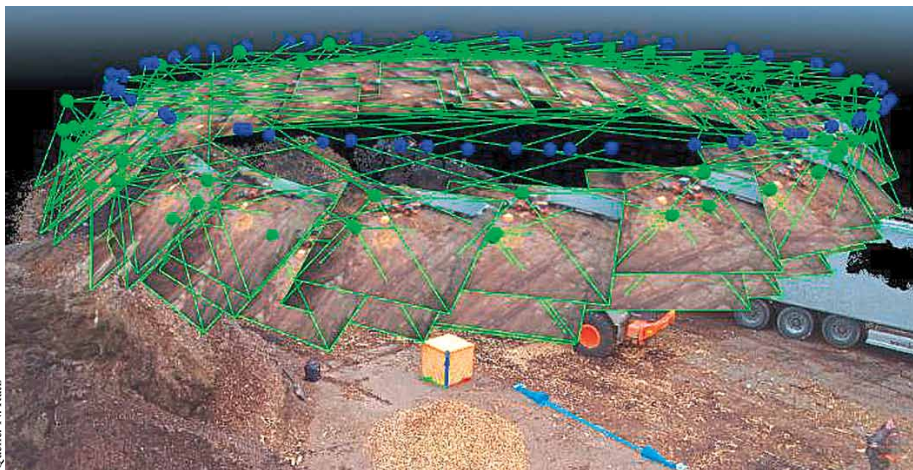


Hackschnitzelhaufen mit Drohnentechnik vermessen

Biomasse in Form von Hackschnitzeln wird seit vielen Jahren verstärkt für die Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen genutzt. Eine exakte Volumenbestimmung der angelieferten Biomassemengen ist dabei eine grundlegende Notwendigkeit für Planung, Logistik und Vorratsinventuren. Eine genaue Volumenbestimmung stellt jedoch noch immer eine technische Herausforderung dar.



Quelle: N. Katz

Abb. 1: Automatischer UAV-Luftbildplan einer Hackschnitzelhaufenvermessung mit > 80 % Bildüberlappung

Jan-Peter Mund, Nikolas Katz, Stuart Krause,
Tobias Cremer

Zurzeit werden Hackschnitzelhaufen in der Regel per Augenmaß oder von Hand mit einfachen Messverfahren vermessen. Das kann zwangsweise zu schwer abschätzbaren und nicht immer nachvollziehbaren Fehlern führen. Aufgrund der unregelmäßigen Oberflächen- ausformung und der variierenden Höhen von größeren Hackschnitzelhaufen lässt sich deren Volumen mit einfachen Verfahren kaum genau ermitteln. Unregelmäßige Formen der Haufen auf der Rückseite oder vom Boden aus nicht ersichtliche Löcher im oberen Bereich eines Hackschnitzelhaufens haben häufig größere Messfehler zur Folge oder erfordern hohe Toleranzen in der Volumenbestimmung. Für exakte Messungen mit einer hohen Genauigkeit kommen bislang in erster Linie Laserscanner infrage, die jedoch den Nachteil haben, teuer und unflexibel zu sein. Eine innovative und gänzlich andere Arbeitsweise bietet dagegen die Vermessung und Volumenberech-

nung von Hohl- und Vollformen (wie z. B. Schüttgut-/Hackschnitzelhaufen) mittels Stereofotogrammetrie auf der Basis von Nahbereichsluftbildern, die mit unbemannten Fluggeräten (UAV) erhoben wurden. Der Faktor Mensch ist bei dieser Methode zur Ermittlung der Messgrößen ausgeschaltet und nur noch für die Planung und Überwachung des UAV-Luftbildfluges verantwort-

Schneller Überblick

- UAV-Nahbereichsluftbilder ermöglichen eine flexible, effiziente und genaue räumliche Vermessung von Hackschnitzelhaufen oder anderer großer Lagermengen von Schüttgütern
- der Einfluss des „Faktors Mensch“ wird reduziert, die Arbeitssicherheit erhöht
- im Rahmen regelmäßig wiederkehrender Inventuren bietet der Einsatz von Drohnen daher deutliche Vorteile gegenüber konventionellen Verfahren

lich. Auch ein Betreten des Schüttgutes ist nicht mehr notwendig, was zu einer Verbesserung der Arbeitssicherheit führt.

Volumenbestimmung durch Auswertung von Drohnenbildern

Hochauflösende Luftbilder solcher Drohnen leisten in der Forstwirtschaft bereits vielfach gute Dienste. Die fotogrammetrische Auswertung von Drohnenluftbildern ermöglicht z. B. das Monitoring von Waldbeständen, die Beobachtung von Kalamitäts- und Schadflächen, die Erstellung digitaler Geländemodelle und maßstablicher Orthofotos, aber auch die Volumeberechnung von 3D-Objekten in der Landschaft. Die Anwendungsmöglichkeiten reichen heute bereits von der Foto- und Videodokumentation ganzer Bestände oder bedeutender Einzelbäume, bis zur Vermessung des Kronenschlussgrades sowie zur Erfassung von Inventurparametern. Zur Volumenermittlung von Holzpoltern oder zur Vermessung größerer Schüttgut-Lagermengen verschiedenster Rohstoffe aus der Luft werden UAV bislang hingegen nur im Ausnahmefall eingesetzt. Daher existieren kaum Erfahrungen mit dieser innovativen Methode der Volumenermittlung (siehe z. B. [4]). Der Einsatz solcher teilautonom agierenden UAV-Systeme in der Vermessung von Biomassevolumina in größerem Maßstab kann die Präzision der Arbeitsabläufe verbessern und gleichzeitig die Arbeitseffizienz bei komplexen Aufgabenstellungen steigern.

Material und Methoden

In diesem Artikel stellen die Autoren der Hochschule für Nachhaltige Entwicklung in Eberswalde ihre Ergebnisse und Erfahrungen zur Volumenermittlung von Hackschnitzelhaufen mithilfe von UAV vor. Anlass für die Untersuchungen waren

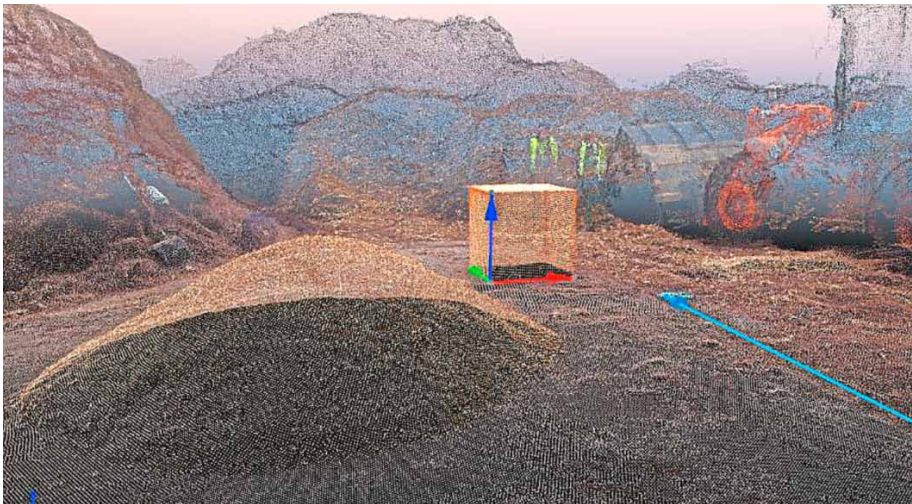


Abb. 2: 3d-Punktwolke eines kleinen Hackschnitzelhaufens mit Referenzobjekten (1 m³ Hohlblock stehend und 5 m Maßstab liegend) während der Feldversuche

zahlreiche Gespräche mit Betreibern von Biomasseheizkraftwerken, die immer wieder über die bereits beschriebenen Schwierigkeiten bei der Volumenermittlung von Hackschnitzelhaufen berichteten. Diese Schwierigkeiten führen insbesondere im Rahmen der regelmäßig wiederkehrenden, gesetzlich vorgeschriebenen Inventuren, für die möglichst genaue, zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse verlangt werden, zu Unsicherheiten. Anhand der vorgestellten Messkampagne werden die konkreten Nutzungsmöglichkeiten von Drohnen zur Volumenermittlung von Hackschnitzelhaufen für die Energiewirtschaft kritisch beleuchtet.

Die hier präsentierte Methode zur Volumenberechnung von größeren Schüttguthaufen basiert auf einem fotogrammetrischen Verfahren unter Verwendung von UAV-Nahbereichsluftbildern. Die inneren und äußeren Orientierungswerte der RGB-Luftbildmosaik werden dabei direkt mithilfe eines 3D-Image-Vectors durch die Verknüpfung homologer Bildpunkte in jedem Bild berechnet. Die eigentliche Vermessung der 3D-Objekte bzw. der Volumina erfolgt berührungslos und kann innerhalb kürzester Zeit ohne größeren technischen Aufwand auf Basis eines systematischen und automatischen Drohnenfluges vor Ort erfolgen.

Stand der UAV-Technik

Für den Einsatz der heute schon sehr agilen zivilen Drohnen und Multikopter sind momentan drei wichtige Trends bezüglich der Innovation und der Einsatzfelder erkennbar:

- Steigerung der Leistungsfähigkeit und Agilität durch Verlängerung der Batterielaufzeiten und kompaktere Baugrößen;
- Automatisierung der Flugpläne auch für komplexe Einsatzzwecke;
- bessere Verfügbarkeit von teilautomatisierter, professioneller Fotogrammetrie-Software.

Mit den Luftbilddaufnahmen von semi-professionellen ready-to-fly Consumer-Drohnen (rtf-Drohnen) können bereits heute komplexe und fotogrammetrisch exakte, dreidimensionale Modelle von Hackschnitzelhaufen berechnet werden. Dabei wird für Vermessungen solcher Schüttgutvolumina eine agile und kleine UAV-Plattform bevorzugt, die trotz der Flexibilität das benötigte ruhige Flugverhalten aufweist und darüber hinaus die Möglichkeit besitzt, automatische Flugpläne zu implementieren. UAV-Luftbildfotogrammetrie liefert die benötigten exakten lokalen 3D-Rauminformationen, die wiederum eine möglichst genaue Erfassung und Berechnung von 3D-Volumina erlauben. Die fotogrammetrischen UAV-Verfahren sind flexibel



Abb. 3: DOM/DSM-Berechnung eines Hackschnitzelhaufens

einsetzbar. Es wird jedoch stets eine räumliche Referenzinformation benötigt, um korrekte metrische Resultate zu erhalten. Im Ergebnis kann der geschulte Anwender dann anhand seines Vorwissens und seiner Erfahrung das ermittelte Volumen eines Hackschnitzelhaufens in entsprechende Energieäquivalente umrechnen. So enthält z. B. ein Schüttraummeter Fichtenhackschnitzel bei einem Wassergehalt von 30 % einen Heizwert von 744 kWh [1].

Die heute gängigen UAV-Anbieter liefern bereits zahlreiche Komplettsysteme bestehend aus Kopter, Kamera, Fernsteuerung, First-Person-View(FPV)-Monitor und Flugplanungssoftware für unterschiedliche Anwendungen. Die Auswertung der gewonnenen, hochauflösenden Datenmengen mit einer Bildauflösung von weniger als 5 cm pro Pixel stellt allerdings einige Anforderungen an die Hardware. Um die großen Datenmengen zeitnah und sinnvoll zu verarbeiten, wird ein leistungsstarker Mehrkernrechner mit großer Speicherkapazität und hoher paralleler Rechenleistung benötigt.

Vermessung und Volumenberechnung von Schüttgutmengen

Die Volumenberechnung eines 3D-Objektes wird grundsätzlich in vier Teilschritte unterteilt:

1. Erstellung eines automatischen Flugplans und virtuellen Luftbildplans mit mind. 80 % Bildüberlappung in beide Flugrichtungen (siehe Abb. 1);
2. Erstellen von Bildern des Untersuchungsobjektes aus verschiedenen Blickwinkeln;
3. Prozessieren der Bilder zu 3D-Punktwolken mit „Structure for motion“-Algorithmen (siehe Abb. 2);
4. Volumenberechnung aus der Punktwolke oder abgeleiteten 3D-Modellen (siehe Abb. 3 und 4).

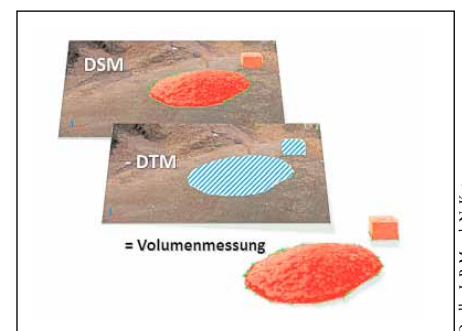


Abb. 4: Berechnung des Differenzmodells

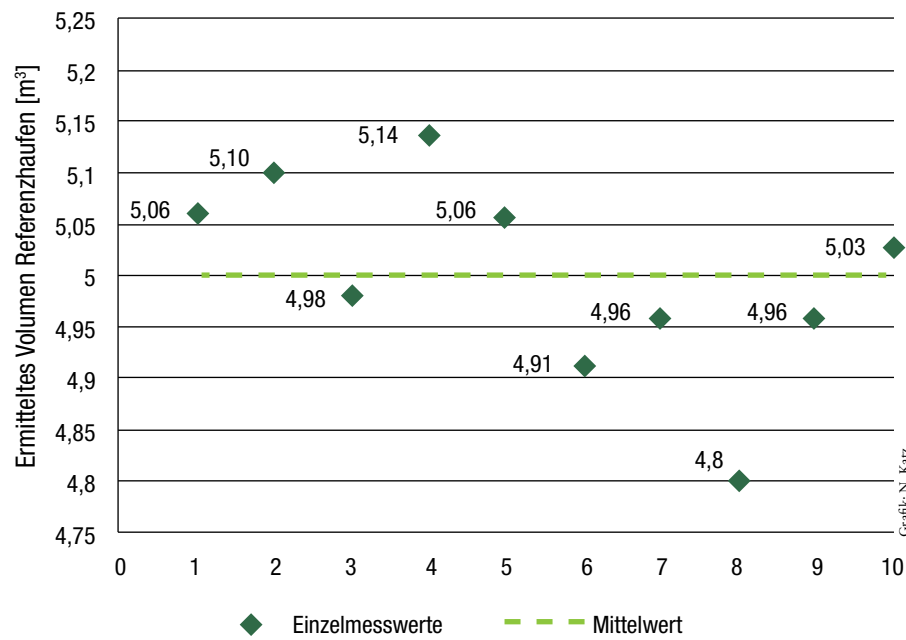


Abb. 5: Ermitteltes Volumen des Referenzhaufen

Für die Luftbildmosaik und die Berechnung eines digitalen Oberflächenmodells (DOM/DSM) werden moderne fotogrammetrische Ansätze nach dem Prinzip „Structure from Motion“ (SfM) verwendet. Bei der Nutzung dieser Algorithmen [2] ist eine Voraussetzung für die spätere fotogrammetrische Auswertung, dass jeder Objektpunkt in mindestens zwei Bildern mit unterschiedlichen Bildmittelpunkten zu sehen ist. Um das zu erreichen, müssen Bilder des Untersuchungsobjektes mit möglichst großer Überlappung aufgenommen werden. Dazu wird, nach der Festlegung eines Mittelpunktes oder eines Erfassungstransektes in der ungefähren Mitte des Hackschnitzelhaufens und der Festlegung eines ausreichenden Radius, das zu vermessende Objekt von der Drohne systematisch autonom umflogen und aus unterschiedlichen Winkeln fotografisch erfasst, um dabei mehrere Fotos mit großer Überlappung aufzuzeichnen (Abb. 1).

Für die nachfolgende Berechnung der Punktwolke (Abb. 2) sowie der abgeleiteten Volumina (Abb. 3) werden in der gewählten Software verschiedene Werte der inneren und äußeren Orientierung der Einzelbilder herangezogen. Als Ergebnis der Auswertung erhält man eine Punktwolke, das heißt, das Untersuchungsobjekt wird durch einzelne fotogrammetrische 3D-Punkte dargestellt (Abb. 2 und 3). Jeder einzelne Punkt besitzt hierbei korrekte absolute Koordinaten, sodass aus der

Punktwolke beliebige Maße und Volumina abgegriffen werden können. Diese erzeugte Punktwolke mit exakten Bildkoordinaten und bekannten Referenzobjekten wird im folgenden Arbeitsschritt zur Berechnung des Volumens herangezogen. Aufgrund der Bildkoordinaten errechnet die Software vollautomatisch ein digitales Oberflächenmodell (DOM/DSM, vgl. Abb. 3) sowie ein digitales Höhenmodell (DHM/DTM), das anhand der GNSS-Koordinaten der Drohne sogar räumlich präzise lokalisiert werden kann.

Für die Berechnung eines Differenzmodells der Oberflächen oder Volumina bieten sich grundsätzlich zwei Lösungswege an. In beiden Fällen kann dann durch die Differenzbildung der beiden Datensätze das gesuchte Volumen bestimmt werden. Entweder wird das DHM/DTM, also das Gelände vor der Aufschüttung, in einer Nullmessung zuerst bestimmt, oder das DOM/DSM, also das aufgeschüttete Volumen, wird zuerst durch das Editieren der Punktwolke konstruiert. Anschließend erfolgt die Berechnung des Differenzmodells in Form der Volumenmessung durch eine einfache Subtraktion des DHM/DTM vom DOM/DSM, (Abb. 4.) Die Vermessung und Berechnung auch größerer Volumina lässt sich mit einer entsprechenden Software also ohne großen Aufwand durchführen. So können auch große oder mehrere Hackschnitzelhaufen (> 1.000 m³) in wenigen Minuten erfasst und berechnet werden.

Versuchsmessungen und Referenzgenauigkeiten

Durch eine Kooperation mit großen Biomasseheizkraftwerken konnte die HNEE im Rahmen eines Forschungsprojektes [3] im Frühjahr 2017 zahlreiche Messflüge an Hackschnitzelhaufen verschiedener Größe durchführen. Als Referenzmessung wurden zusätzlich an einem extra konstruierten und vermessenen 1 m³ großen Holzwürfel sowie einem 5 m³ großen Hackschnitzelhaufen Probemessungen durchgeführt. Diese als Referenz dienenden Volumina wurden wie bereits oben beschrieben umflogen, fotografisch erfasst und mit identischen Mess- und Berechnungsmethoden analysiert. Für zusätzliche Genauigkeit sorgen die sogenannten Zwangsbedingungen der inneren und äußeren Orientierung, die in die exakte Berechnung der Volumina miteinbezogen wurden.

Die gewonnenen Ergebnisse am Referenzhaufen streuten nur gering um das tatsächliche Volumen von 5 m³ mit einer maximalen Abweichung von $\pm 0,2$ m³ und einem durchschnittlichen Fehler von $\pm 0,15$ m³. Aus zehn Messflügen mit variiertem Oberflächenstruktur und Ausformung des Haufens ergab sich als Mittelwert das Referenzvolumen von exakt 5 m³ (Abb. 5).

Die Messungen an dem 1 m³-Würfel und einem 1.700 m³ großen Hackschnitzelhaufen kamen zu ähnlich guten Ergebnissen: Bei dem Würfel lag der Fehler der Volumenermittlung bei ca. 1 % und bei den Probemessungen am großen Haufen (Abb. 6) mit lediglich 1,3 % nur geringfügig höher. Bei den Vergleichsmessungen am Referenzhaufen (Abb. 2 und 3) ergaben sich ebenfalls nur sehr geringe Fehlerwerte mit Abweichungen zwischen 1 bis 3 % vom realen Gesamtvolumen. Insgesamt stellt dieses Ergebnis also eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit gegenüber herkömmlichen Vermessungsmethoden dar.

Fazit: Mehr Objektivität und verbesserte Reproduzierbarkeit

Die hier vorgestellte Methode ermöglicht die schnelle und präzise räumliche Vermessung einzelner oder mehrerer Hackschnitzelhaufen oder anderer großer Lagermengen von Schüttgütern. Im Vergleich zu den herkömmlichen Methoden zeigte sich das neue Verfahren als sehr viel flexibler, sowohl bei der Vermessung als auch bei der

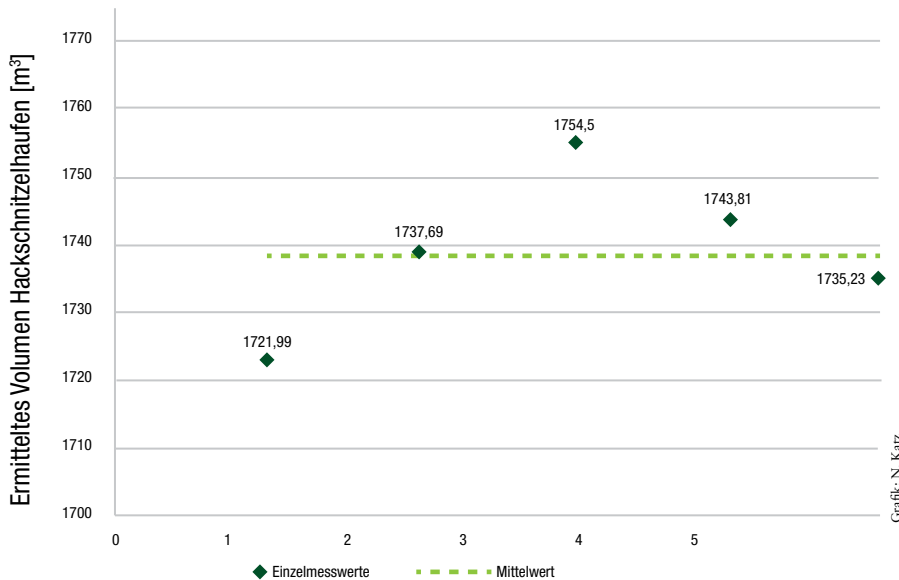


Abb. 6: Ermitteltes Volumen eines beispielhaft vermessenen Hackschnitzelhaufens

Auswertung sogar größerer und unterschiedlicher Schüttgüter. Die aufgetretenen Fehlerwerte fallen in gängige und auch formell akzeptierte Toleranzbereiche. Sie sind insbesondere abhängig von der Genauigkeit des Versuchsaufbaus bzw. der Flugplangestaltung sowie von der Präzision vor allem der größtenteils semi-automatisch gewonnenen Daten. Allerdings ist zu beachten, dass die Methode wetterabhängig ist und insbesondere bei starkem Wind oder Regen nicht zum Einsatz gebracht werden kann – ansonsten sind höhere Fehler bzw. stärkere Abweichungen der ermit-

telten Werte vom tatsächlichen Volumen zu erwarten.

Die gemachten Aussagen basieren auf einer Fallstudie, die im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt wurde. Weitere Messungen zur validen Abschätzung der Genauigkeit der ermittelten Volumina sind unabdingbar und werden in den nächsten Monaten in weiteren Arbeiten erfolgen.

Das vorgestellte Verfahren besitzt grundsätzlich im Hinblick auf die Nutzung im Rahmen der regelmäßig wiederkehrenden Inventuren auf Lagerplätzen große Vorteile, da der Einfluss des „Faktors Mensch“

(Gutachterliches Schätzen der Ausmaße der Haufen) deutlich verringert und somit die Objektivität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse signifikant erhöht wird. Vor dem Hintergrund einer weiteren Digitalisierung der Forst- und Holzwirtschaft wird die Bedeutung solcher Verfahren künftig weiter zunehmen und an Relevanz bei der Volumenermittlung von Hackschnitzelhaufen gewinnen.

Literaturhinweise:

- [1] ARBEITSGEMEINSCHAFT QM HOLZHEIZWERKE (2004): Planungs- handbuch. Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 4. 248 S., Straubing. [2] HUANG, T.; KOHONEN, T.; SCHROEDER, M. R. (1993): Motion and Structure from Image Sequences, Springer-Verlag, Berlin. [3] KATZ, N. (2017): Hackschnitzelhaufenvermessung mittels UAV. Bachelorarbeit am Fachbereich für Wald und Umwelt der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde. 42 S. [4] MOKROŠ M.; TABACÁK, M.; LIESKOVSKÝ, M.; FABRIKA, M. (2016): Unmanned aerial vehicle use for wood chips pile volume estimation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic. [5] OTEPKA, J.; GHUFFAR, S.; WALDHAUSER, C.; HOCHREITER, R.; PFEIFER, N. (2013) Georeferenced Point Clouds: A Survey of Features and Point Cloud Management; ISPRS International Journal of Geo-Information, 2(4), 1038-1065; doi:10.3390/ijgi2041038.

Jan-Peter Mund,
Jan-Peter.Mund@hnee.de, ist
Leiter des Fachgebietes GIS und
Fernerkundung, Fachbereich 1,
an der HNEE. **Nikolas Katz** und
Stuart Krause sind Mitarbeiter an
der HNEE und am Thünen Institut
für Waldinventuren, Eberswalde.
Prof. Dr. Tobias Cremer vertritt
das Fachgebiet Forstnutzung und
Holzmarkt an der HNEE.

