Inventur und Monitoring über Satellitendaten?

Nutzung von Satellitendaten für die forstliche Betriebsplanung

Von Alata Elatawneh, Adelheid Rappl, Thomas Schneider, Antje Thiele und Stefan Hinz

Inventur und Nachführung der Datenbestände (Monitoring) sind Kernaufgaben eines Forstbetriebs. Die Kosten machen Alternativen zu der „klassischen" Forstinventur immer attraktiver. Aufgrund ihrer Datenqualität und Aufnahmekonzepte scheinen die neuen deutschen Satellitensysteme Rapid Eye (optisch) und TerraSAR-X (Radar) geeignet für die Erhebung bestimmter forstlicher Daten. Mehr noch, die beiden unterschiedlichen Systeme könnten einander gut ergänzen. Mit dem Vorhaben „Methodenentwicklung zur Nutzung von Parametern aus Satellitendaten im Rahmen der forstlichen Betriebsplanung und des forstlichen Katastrophenmanagements" wird geprüft, welche Möglichkeiten sich mit RapidEye und TerraSAR-X erschließen lassen)*

Zielsetzung

Ein Inventur- und Monitoring-System für den Wald-Forst-Bereich soll sowohl ökonomische als auch ökologische Gesichtspunkte berücksichtigen. Und es soll Informationen liefern, die für den laufenden Forstbetrieb und ebenso für die Erfüllung der Berichtspflichten geeignet sind, die aus nationalen und internationalen Verpflichtungen erwachsen. Die Einbindung der Fernerkundung als wesentlicher Bestandteil soll einerseits die Nachprüfbarkeit der Daten sicherstellen (Transparenz), andererseits aber auch Kosten sparen (Effizienz). Das System bietet Informationen zu:

- **Bestandsaufnahmen:** Inventur und/oder Fortschreibung,
- **Zustandsbericht:** z.B. Waldzustandsbericht, Natura 2000, FFH, WRR etc. und
- **Prognose:** Szenarien zu möglichen Varianten, etwa bei der Entwicklung des Holzmarktes, der Klimaänderung etc.

Anders als bei den bisherigen Methoden soll die Erfassung, Beurteilung und Nachführung der Datenbestände unabhängig von der Waldbesitzart erfolgen.

Im Hinblick auf das strategische Konzept wird untersucht, inwieweit eine jährliche Nachführung möglich ist und inwieweit diese Informationen im Bedarfsfall, also bei Kalamitäten, möglichst schnell bereitgestellt werden könnten.

Mit den Satellitensystemen TerraSAR-X (TSX) und RapidEye (RE) stehen seit 2008 zwei in vielen Aspekten gegensätzliche Fernerkundungssysteme zur Verfügung (siehe Kasten). Beide Systeme erscheinen geeignet, Informationen im Maßstab 1 : 10 000 zu liefern. Sie sind damit für die Betriebsebene der Forstwirtschaft von Interesse, die Aussagen können für die strategische und taktische Planungsunterstützung im Forst/Holz-Bereich genutzt werden.

Die Auswertung einer dreistufig angelegten Bedarfsanalyse zum Einsatz der Fernerkundung im Umfeld der Bayerischen Forstwirtschaft, mit über 500 Beteiligten aus der Forstverwaltung (Stufe 1), den Forstwissenschaften (Stufe 2) sowie der Forstpraxis (v.a. AELF, Stufe 3) [1] hat den Bedarf wie folgt umrissen (häufigste Nennungen):

- **Erfassung:** Waldfläche, Lücken, Baumarten, Schädigung,
- **Informationsebene:** Bestand bzw. Flurstück,
- **Wiederholung:** jährlich bzw. bei Bedarf im Falle von Kalamitäten).

Material und Methode

Die hier vorgestellten Konzepte bauen auf die herausragenden neuen Eigenschaften der beiden Satellitensysteme (s. Kasten) sowie einander stützende bzw. ergänzende Effekte bei der gleichzeitigen Nutzung beider Systeme.

Neue Möglichkeiten werden auch durch die Kombination beider Systeme geschaffen. Durch Aufnahme der Testflächen mit beiden Systemen werden die Genauigkeiten der abgeleiteten Messwerte verglichen und ihre Aussagen zusammengeführt.

RapidEye und TerraSAR-X

Optische Sensoren wie RapidEye ‚sehen' anders als die Radar-Sensoren, hier TerraSAR-X. Optische Sensoren nutzen die Wellenlängenbereiche im ‚Sichtbaren' (400 bis 700 Nanometer), nahen Infrarot (NIR, 700 bis 1 100 nm) und kurzwelligen Infrarot (KWIR, 1 100 bis 2 500 nm). Radar-Systeme nutzen den ‚Mikrowellen'-Bereich von 1 mm bis 1 m. Die Information steckt dann in dem empfangenen und in digitale Bilder gewandelten Signal. Im Falle der optischen Systeme ist es das reflektierte Sonnenlicht, bei Radarsystemen ist es das in Pulsen ausgesendete und dann zurückgestreute Radarsignal. Entsprechend bilden diese Systeme unterschiedliche Objekteigenschaften ab. Allgemein kann gesagt wer-

A. Elatawneh ist Projektbearbeiter des Vorhabens am FG für Waldinventur und nachhaltige Nutzung der Technischen Universität München (TUM). A. Rappl ist Projektbearbeiterin des Vorhabens für die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Dipl.-Geol. Dr. T. Schneider ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung der TUM. Er leitet die Arbeitsgruppe Geoinformatik des Fachgebietes und ist Projektleiter des vorgestellten Vorhabens. A. Thiele ist Projektbearbeiterin des Vorhabens für das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT) Prof. Dr. S. Hinz ist Leiter des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung des KIT.

Alata Elatawneh
alataaa@yahoo.com

**) Das Vorhaben wird im Rahmen des BMWi/DLR Raumfahrtdirektion-Programms zur synergetischen Nutzung von Rapid Eye und TerraSAR-X Daten (FöKz. 50EE0919) gefördert. Die Bayerische Forstverwaltung stellte die Forstbetriebsdaten sowie ergänzende GIS-Daten und Luftbilder bereit.*

den: Optische Systeme erlauben Aussagen zu Pigment- und Wassergehalt sowie der Zellstruktur, während Radar eher Aussagen zu Oberflächenstrukturen ermöglicht. Die Umrisse von Vegetation (Objektgeometrien) sind jedoch in beiden Datentypen gut zu erkennen und erlauben eine eindeutige Zuordnung.

Die schnelle Wiederholungsrate und hohe Auflösung der **RapidEye-Aufnahmen** (RE) erlaubt erstmalig, jahreszeitliche Prozesse auf größerem Raum zu erfassen. Das Vorhaben untersucht nun, ob sich über die Abbildung der phänologischen Entwicklung (mehrere Aufnahmen über die Vegetationsperiode) die Baumarten besser unterscheiden lassen [2, 3, 4]. Vorausgesetzt wird dabei, dass die phänologische Entwicklung bei den einzelnen Baumarten synchron verläuft. Durch Einbindung der phänologischen Beobachtungen der Waldklimastationen Bayerns sollen die beobachteten Entwicklungsstadien für das entsprechende Wuchsgebiet genutzt werden, um die RE-Datenauswertung in das phänologische Schema ‚einzuhängen'.

Als Anwendung für die Daten von **TerraSAR-X** wird untersucht, ob sich durch die verbesserte räumliche Auflösung die Waldstrukturen erheblich genauer ableiten lassen. Waldränder, Lücken, Oberflächenrauigkeit und deren Änderungen stehen im Zentrum des Interesses. Im Katastrophenfall sollten diese Daten rasch verfügbar sein.

Im Vorhaben werden zwei Vegetationszyklen (2009/2011 für RE, 2010/2011 für TSX) mit jeweils fünf Aufnahmezeiten je Vegetationsperiode für insgesamt fünf Testgebiete ausgewertet. Um die Übertragbarkeit der Algorithmen zu gewährleisten, findet die Entwicklung auf Testgebieten in vier bayerischen Wuchsgebieten (WG) statt:

- Testgebiet (TG) Oberammergau: WG Bayerische Alpen (WG 15),
- TG Stadtwald Traunstein: WG Schwäbisch-Bayerische Jungmoräne und Molassevorberge (WG 14),
- TG Freising: WG Tertiäres Hügelland (WG 12),
- TG Nationalpark Bayerischer Wald: WG Bayerischer Wald (WG 11) und
- TG Iphofen: WG Fränkischer Keuper und Albvorland (WG 5).

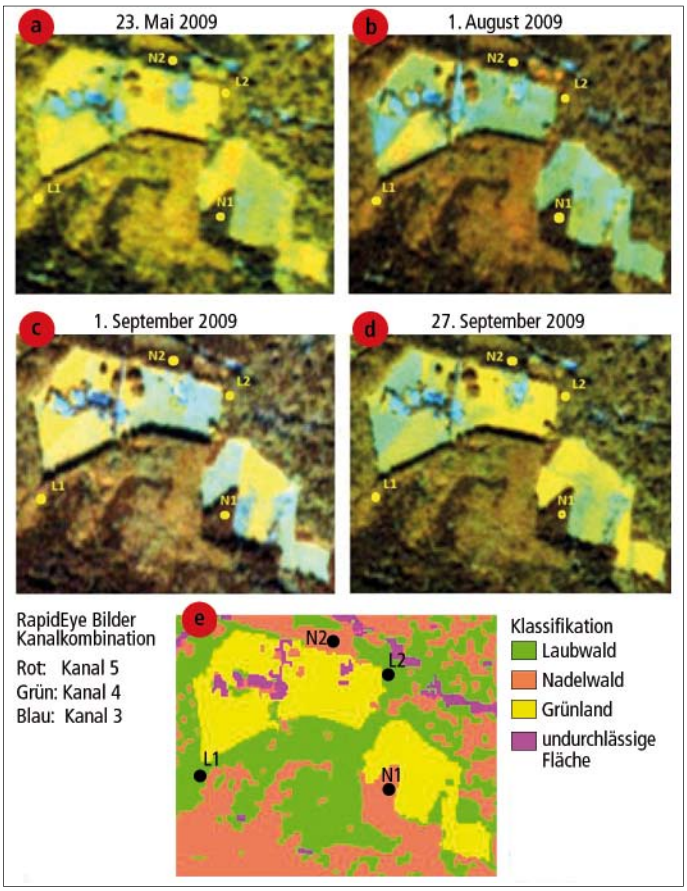

Abb. 1: Beispiel aus dem Testgebiet Nationalpark Bayerischer Wald, nordöstlich der Ortschaft Spiegelau, Ausschnitte von RapidEye Aufnahmen zu vier unterschiedlichen Phasen der Vegetationsentwicklung (a-d)). Jeweils zwei Nadel- und Laubbaum-Objekte (N1, N2 ,L1, L2) sind markiert. Das vorläufige Klassifikationsergebnis (e) soll ausschließlich der schnellen Zuordnung dienen.

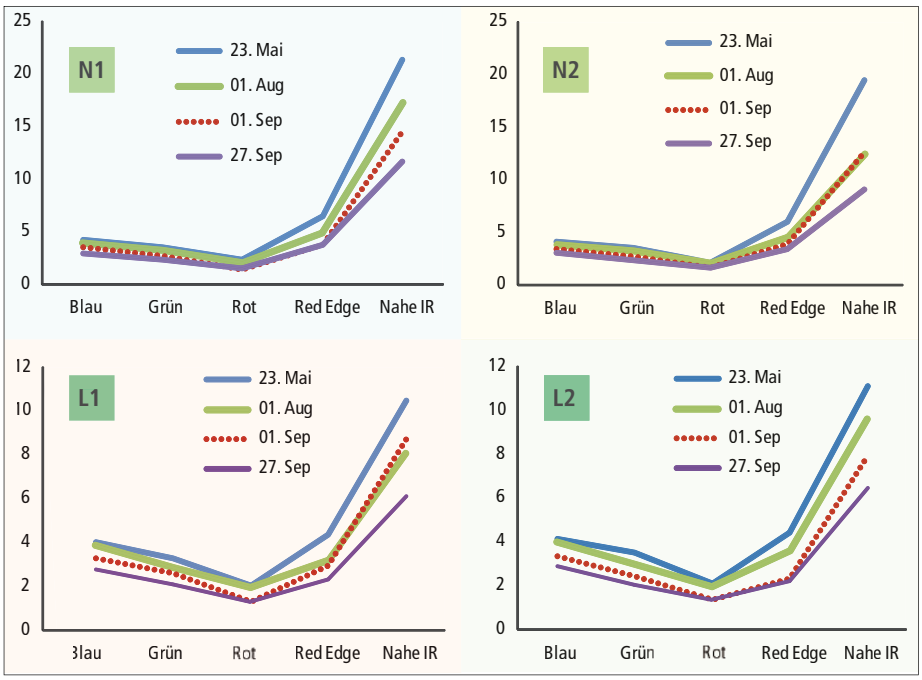

Abb. 2: In Reflexionsprozent umgerechnetes RapidEye-Signal der jeweils zwei in Abb. 1 markierten Laubbaum- (L1, L2) und Nadelbaum-Objekten (N1, N2) für die vier dargestellten Aufnahmezeitpunkte. Für alle vier Oberflächentypen kann eine Veränderung der Signatur beobachtet werden, die sich der phänologischen Entwicklung zuordnen lässt.

Erste Analysen

Anhand der Abb. 1 bis 3 sollen die Auswertungsansätze für die beiden Datentypen verdeutlicht werden. Ein Mischwaldgebiet mit eingeschlossenen Wiesenflächen des Testgebietes Nationalpark Bayerischer Wald, in der Nähe der Ortschaft Spiegelau, ist dargestellt (RE: Abb. 1, TSX: Abb. 3).

In Abb. 1 sind vier RE-Bildausschnitte der Falschfarbenkombination NIR, Übergangsbereich (Red Edge) und rot (RGB) von vier Zeitpunkten der Vegetationsperiode dargestellt. Die wechselnden Farben weisen auf physiologisch/phänologische Unterschiede hin. Noch ist keine Atmosphärenkorrektur angewandt worden, die Voraus-

Die Satellitensysteme

RapidEye (RE) ermöglicht eine bisher unerreicht schnelle Wiederholrate bei einer hohen räumlichen Auflösung.

- Zahl der Satelliten: 5
- Umlaufbahn-Höhe: 630 km
- Umlaufbahn-Ebenen: 1 (gleichmäßige Verteilung)
- Inklination: 97,8 ° (sonnensynchron)
- Äquator-Überflug: 11:00 Uhr Ortszeit (von Nord nach Süd)
- Bodenauflösung: 6,5 m
- Pixelgröße (ortho-rektifiziert): 5 m
- Breite der Bildstreifen: 77 Km
- Länge der Bildstreifen: maximal 1 500 Km
- Tägliche Aufnahmekapazität: 4 Mio km²
- Kanäle des RapidEye-Sensors:
  440 - 510 nm (blau)
  520 - 590 nm (grün)
  630 - 685 nm (rot)
  690 - 730 nm (rot)
  760 - 850 nm (nahinfrarot, NIR)

TerraSAR-X (TSX) bietet im „High Resolution SpotLight Mode" räumliche Auflösung bis zu 1 m. Im Vergleich zu bisherigen, zivilen „Synthetic Aperture Radar" (SAR) Satelliten bedeutet dies eine Verbesserung um mehr als eine Größenordnung und somit eine neue Qualität an SAR-Daten im X-Band, die eine Vielzahl von neuen Anwendungen ermöglicht [6].

- Bahnhöhe: 514 km
- Bahnneigung: 97,44 °; erdfernster Punkt (Apogäum): 530 km, erdnächster Punkt (Perigäum): 512 km
- Wellenlänge: 31 mm (Frequenz: 9.6 GHz)
- Hauptaufnahme-Auswahl:
  o High Resolution SpotLight: bis zu 1 m Auflösung, Szenengröße 10 km x 5 km
  o SpotLight: bis zu 2 m Auflösung, Szenengröße 10 km x 10 km
  o StripMap: bis zu 3 m Auflösung, Szenengröße 30 km x 50 km
  o ScanSAR: bis zu 18 m Auflösung, Szenengröße 100 km x 150 km
- Polarimetrische Aufnahmekombinationen:
  o Einzel- oder Dual-Polarisation, vollpolarimetrisch
- Produkttypen (Verarbeitungsebenen):
  o Single-Look Slant Range Complex (SSC)
  o Multi-Look Ground Range Detected (MGD)
  o Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC)
  o Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC)

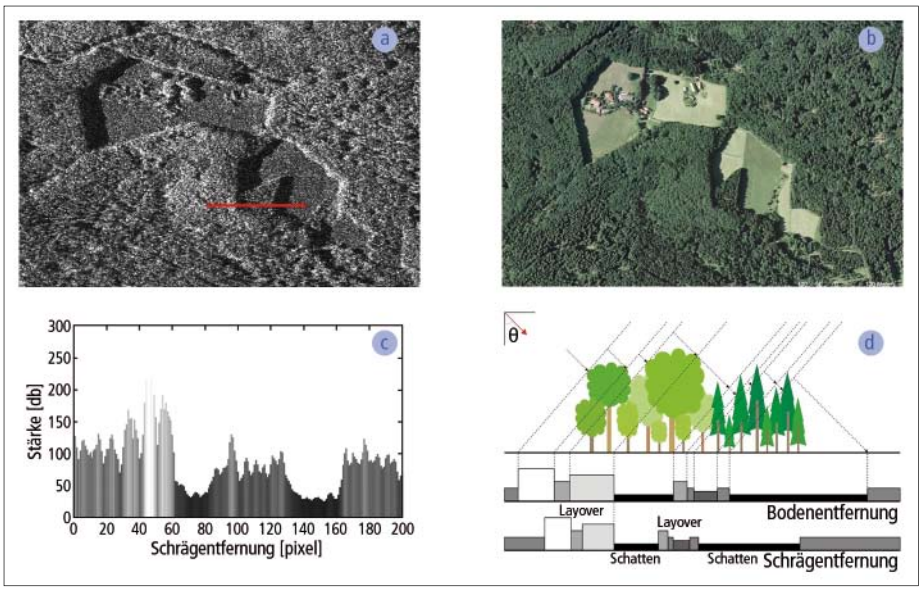

Abb. 3: Beispiel aus dem Nationalpark Bayerischer Wald, nordöstlich der Ortschaft Spiegelau: (a) SAR Magnitudenbild 2010, (b) Luftbild 2001, (c) reales Magnitudenprofil (rot markiert in [a]) und (d) schematische Darstellung der SAR Rückstreuphänomene

setzung ist für die späteren Analysen. Das Signal der versiegelten Flächen (Hof, Dächer, hier dargestellt in Blau) ist konstant. Die Mähwiesen zeigen die deutlichsten Signaländerungen. Über Korrelationen mit Mess-Serien am Boden ließen sich sehr einfach Biomasse, Pigmentgehalte etc. mit diesen Signaländerungen verknüpfen und flächige Aussagen treffen. Veränderungen im Wald sind sowohl für Laub- als auch für Nadelbäume sichtbar, aber wesentlich schwächer ausgeprägt.

Um diese schwachen Signaländerungen gezielt ansprechen zu können, extrahiert man die spektralen Signaturen solcher über Pixelgruppen abgebildeter Objekte. Abb. 2 zeigt jeweils zwei Beispiele für Laub- (L1, L2) und Nadelbaumgruppen (N1, N2). Um physiologisch/phänologische Veränderungen über die Vegetationsperiode quantitativ bestimmen zu können, müssen Einflüsse durch Beleuchtung und Atmosphäre bekannt und korrigiert werden. Zum jetzigen Bearbeitungsstand ist lediglich eine Beleuchtungskorrektur angewandt worden, die Größenordnung der atmosphärischen Einflüsse wird für die folgende (deskriptive/qualitative) Analyse als vernachlässigbar betrachtet. Der Effekt ist aber sichtbar. So zeigt sich z.B. die Wirkung der Rayleigh-Streuung, indem im blauen Band ein höheres Signal gemessen wird als im grünen und roten Band. Die für die hier getroffenen Aussagen wesentliche Sonnenstands-Korrektur erfolgte anhand der Rechenvorschriften und Eichwerte der Firma RapidEye AG (www.RapidEye.de).

In Abb. 2 ist auf den ersten Blick die für RE-Bandbereiche typische höhere Reflexion von Laubbaum-Objekten im Vergleich zu Nadelbaum-Objekten zu sehen (siehe Skalierung der y-Achse). Dies entspricht auch dem Eindruck vor Ort. Veränderungen, die mit der phänologischen Entwicklung erklärt werden können, zeigen die Spektralsignaturen aller vier Objekte. Das typische ‚Grünmaximum' vitaler Vegetation ist auf die verringerte Absorption von Chlorophyll im grünen Spektralbereich zurückzuführen, am deutlichsten zu erkennen in den Spektren für Mai. Die von Mai bis zur letzten September-Aufnahme sinkenden Signalhöhen im NIR, für L1, L2 und N2 auch im RedEdge-Band, kann mit dem Altern der Zellen in den Blättern erklärt werden. Eine detaillierte Vitalitätsanalyse bzw. Studien zur Baumartenunterscheidung können zum derzeitigen Projektstand noch nicht vorgestellt werden.

In Abb. 3 ist das Konzept der TerraSAR-X Informationsableitung dargestellt. Im SAR Magnitudenbild (a) lassen sich deutlich die Waldgrenzen erkennen, die sich entweder durch helle oder dunkle Grauwertbereiche von der Wiesenfläche abheben. Die hellen Grenzen entstehen durch den so genannten Layover-Effekt [7] auf der sensorzugewandten Waldseite. Hierbei kommt es zu einer Aufsummierung der Rückstreusignale aller Objekte (z.B. Bäume, Sträucher), die den gleichen Abstand zum Sensor haben. Die dunklen Grenzen erscheinen auf den sensorabgewandten Waldseiten und zeigen den „Radarschatten" (shadow) [7]. Des Weiteren sind im oberen Bereich des Bildausschnittes Einzelbäume auf der Wiese sowie der Höhenunterschied zwischen zwei Beständen (schwarzer Bogen) erkennbar. Die anderen Waldflächen weisen außerdem größere schwarze Flecken auf, die auf Lücken bzw. Überhälter im Bestand schließen lassen. Zum Vergleich ist in (b) der entsprechende Luftbildausschnitt dargestellt.

Einen Ausblick soll die Detailanalyse in Abb. 3 (c) und (d) vermitteln. Das rot markierte SAR-Magnitudenprofil in (a) ist in

(c) abgetragen, in welchem sich ein sehr heller sowie zwei sehr dunkle Grauwertbereiche erkennen lassen. Das Zustandekommen dieser Signatur ist schematisch in (d) veranschaulicht. Dieser Schnitt durch den Wald ist gekennzeichnet durch einen hohen Laubbaumbestand, gefolgt von einem niedrigeren Nadelbaumbestand. Die sensornahen Laubbäume zeigen eine höhere Rückstreuung (helle Grauwerte) als die Nadelbäume (dunklere Grauwerte). Durch die Höhe der Bäume kommt es zur Abschottung des dahinter liegenden Gebietes, das folglich im Profil fast schwarz erscheint. Da der Laubbaumbestand aber höher ist als der angrenzende jüngere Nadelbaumbestand, kommt es auch zu einem Schatten zwischen beiden Beständen. Mithilfe der Aufnahmeparameter des Satelliten sowie der gemessenen Schattenlängen in dem SAR-Bild kann man die Bestandshöhen abschätzen. Abb. 3 (c) zeigt somit kein Höhenprofil, verdeutlicht jedoch, wie über Signalstärken sowohl auf den Objekttyp als auch auf die Objekthöhe rückgeschlossen werden kann.

Abb. 4 zeigt vier Bilder eines Landschaftsausschnittes im Pufferbereich des Nationalparks Bayerischer Wald, südlich der Nationalparkstraße zwischen Spiegelau und Waldhäuser. Hierbei stellt Bild (a), ein Luftbild aus dem Jahr 2000 (wie z.B. in Google Earth und NAVTEQ MAP24 zu sehen) den Ausgangszustand dar. In den Bildern (b) bis (d) sind Ausschnitte von TSX im Spot-Light Mode, eine Falschfarbendarstellung der Bänder NIR, RedEdge, rot (RGB) und eines Farb-Luftbildes aus dem Archiv der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft aus dem Jahr 2001 zu sehen. Der Schattenwurf macht deutlich, dass die Luftbilder zu unterschiedlichen Tageszeiten aufgenommen wurden. Die TSX-Einstrahlrichtung kommt aus West-Nordwest. Anhand der Erfassungszeit kann die Position der Beleuchtungsquelle (Sonne, Radarantenne) rekonstruiert und über die Schattenlänge die Höhe des Objektes geschätzt werden. Die gelingt jedoch lediglich bei solchen Waldobjekten, die eine gut definierbare „Abbruchkante" haben: Waldränder, Überhälter/Nachhiebsreste, Lücken etc. Durch Kombination mehrerer Quellen, wie etwa in vorliegendem Beispiel, könnten nach und nach die meisten Objekthöhen abgegriffen werden. Die Genauigkeiten stehen den Messungen im Gelände nicht nach. In der Praxis werden vor allem Flugzeug-gestützte Laserscannerdaten oder Stereoluftbilder für eine genaue Höhenmessung oder Bestandeshöhenabschätzung herangezogen. Für diese Aufgaben könnten künftig auch die Aufnahmen der neuen SAR-Satelliten mit einer Abbildungsschärfe von bis zu 1 m Bodenauflösung berücksichtigt werden.

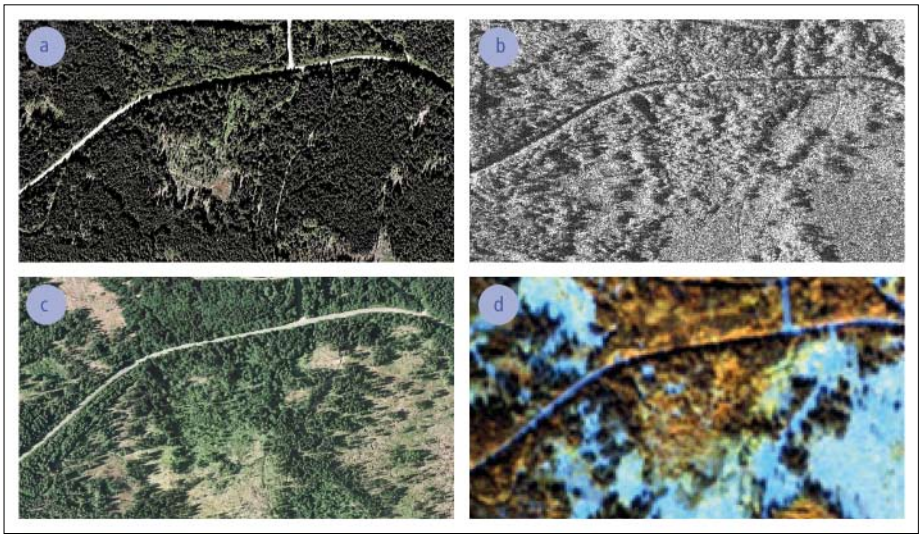

Abb. 4: Beispiel aus dem Nationalpark Bayerischer Wald, östlich der Ortschaft Spiegelau, an der Nationalparkstraße: oben links (a) ist ein Luftbild aus dem Jahr 2000 mit geringen Kalamitätsspuren im Zentrum, unten links (c) ist ein Luftbild aus dem Jahre 2001. Die Auflichtungen sind weit fortgeschritten. Oben rechts (b) ist ein TerraSAR-X Ausschnitt aus dem Jahr 2010, unten rechts (d) ein RapidEye Bildausschnitt aus dem Jahr 2009.

Satellitendaten bei Kalamitäten?

Handelt es sich um eine biotische Kalamität, etwa um Borkenkäferbefall, ist vor allem RE hilfreich. Änderungen im Pigment- und Wassergehalt sowie in der Zellstruktur spiegeln sich in der spektralen Signatur wider und können einem Schadtyp zugeordnet werden. Forschungsziel ist hier die Bestimmung des Schwellenwertes, ab dem die Änderungen eindeutig sind. Eine frühzeitige visuelle Erkennung eines Schädlingsbefalls, etwa durch den Borkenkäfer, kann zum jetzigen Zeitpunkt jedenfalls ausgeschlossen werden. Im Falle von Sturmwurf wird die Früherkennung mit TSX erwartet. Da das Radarsignal Tageszeit- und Bewölkungsunabhängig Informationen liefert, sollte eine erste Abschätzung innerhalb von 48 Stunden möglich sein. Voraussetzung ist allerdings eine regelmäßig nachgeführte Datenbank, die den Sollzustand des Waldes widerspiegelt. Die Kenntnis darüber, welche Schädigungsart in den jeweiligen Satellitendaten wie aussieht, ist ein Kernpunkt des hier vorgestellten Vorhabens [5].

Als Beispiel dient erneut Abb. 4. In den Ausschnitten (b bis c) zeigen alle drei Aufnahmesysteme, Luftbild (c), TSX (b) und RE (d), dass die Waldstruktur sich im Vergleich zum Ausgangsbild (a) verändert hat. Beide Satellitendaten zeigen, dass die Auflösung des Bestandes weiter fortgeschritten ist. Im Luftbild (b) sieht man im mittleren unteren sowie im rechten Bildbereich unregelmäßig liegende Stämme. Ob es sich um Sturmwurf handelt oder um einen Sanitätshieb nach Borkenkäferbefall ist nicht auszumachen und muss anderweitig geklärt werden. Die betroffenen Flächen sind jedenfalls sowohl im Luftbild als auch in der Radar- und optischen Satellitenaufnahme bestimmbar. Die Unterscheidung in Laub- und Nadelbäume ist mit RE sehr einfach: Laubbäume sind in gelb/orange, Nadelbäume in dunkelbraun, trockenes Gras, Straßen in bläulichen Tönen wiedergegeben. Die 2001 noch stehenden Einzelbäume im rechten Bildteil sind in den Satellitendaten nicht mehr nachweisbar. Übrig geblieben sind lediglich noch kleine Gruppen, im TSX-Ausschnitt (b) am Schattenwurf, im RE-Ausschnitt (d) dunkelbraun als Nadelbäume zu erkennen. Auf Flächen wie diesen, die durch einen Sturmwurf und/oder einen Borkenkäferbefall betroffen sind/waren, sollen in Zukunft durch auto-matisierte Auswertungen die weitere Ent-wicklung beobachtet werden.

Durch Abgleich mit den Forstdatenbanken (Revierbüchern etc.), die bei der angestrebten jährlichen Nachführung den Zustand aus Bild (a) wiedergeben müssten, lässt sich sofort die angefallene Holzmenge ermitteln. Die Logistikkette für die Aufarbeitung kann anhand dieser Information in Gang gesetzt werden.

Literaturhinweise:

[1] FELBERMEIER, B.; HAHN, A.; SCHNEIDER, T. (2010): Study on user requirements for remote sensing applications in forestry; Proc. ISPRS Commission VII. Symp., Wien, 1. bis 7.7. 2010. **[2]** KOCH, B.; AMMER, U.; SCHNEIDER, T.; WITTMEIER, H. (1990): Spectral measurements in the laboratory and in the field to analyse the influence of different damage symptoms on the reflectance spectra of forest trees. Int. J. Remote Sens., Bd. 7, Nr. 11, Sonderausgabe zu Fernerkundung und Wald. **[3]** KEY, T.; WARNER, T. A.; MCGRAW, J. B.; FAJVAN, M. A. (2001): A Comparison of Multispectral and Multitemporal Information in High Spatial Resolution Imagery for Classification of Individual Tree Species in a Temperate Hardwood Forest. Remote sensing of environment, 75, S. 100-112. **[4]** WOLTER, P. T.; TOWNSEND, P. A.; STURTEVANT B. R. (2009): Estimation of forest structural parameters using 5 and 10 meter SPOT-5 satellite data. Remote sensing of environment, 113, S. 2019-2036. **[5]** THIELE, A.; HINZ, S.; SCHNEIDER, T.; ELATAWNEH, A.; RAPPL, A.; TROYKE, A.; SEITZ, R.: Fusion of Multi-Modal and Multi-Temporal Satellite Data for Forest Management. ISPRS Symposium TC VII, Wien, 5. bis 7. 7. 2010. **[6]** MORREIRA, A.; BAMLER, R. (2010): IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Bd. 48, Nr. 2. **[7]** BAMLER R. (2000): Principles of Synthetic Aperture Radar. Surveys in Geophysics, Bd. 21, S. 147-157.