

Pauli- und Cloude-Dekompositionstheoreme zur Extraktion des Streuverhaltens landwirtschaftlicher Nutzflächen aus vollpolarimetrischen E-SAR Daten

PIA LIEBESKIND, TANJA RIEDEL & CHRISTIANE C. SCHMULLIUS, Jena

Keywords: remote sensing, polarimetry, target decomposition, agriculture, backscattering behavior

Zusammenfassung: Das Ziel dieser Untersuchung ist, das polarimetrische Streuverhalten ausgewählter Landnutzungen durch Zerlegung der SAR-Rückstreuung in elementare Streumechanismen zu bestimmen. Die Ergebnisse zweier Methoden der Zielzerlegung wurden für drei verschiedene Zeitpunkte der Datenaufnahme analysiert sowie miteinander verglichen. Die Daten wurden im polarimetrischen L-Band aufgezeichnet.

Mit der Ausbildung der Vegetationsstrukturen wurde eine Zunahme der Volumen- und *double bounce*-Streuanteile sowie ein stärkerer Einfluss der sekundären Streuprozesse festgestellt. Der auf unbedeckten Feldern dominante Anteil der Oberflächenstreuung nimmt hingegen mit dem Wachstum der Pflanzen ab. Die Anteile der Streumechanismen einiger Feldfrüchte werden hauptsächlich durch den Einfluss des lokalen Einfallswinkels bestimmt.

Summary: *Pauli- and Cloude-target decomposition theorems for extracting of agriculture fields' backscattering behaviour of polarimetric E-SAR data.* Object of this investigation was to determine the polarimetric scattering behaviour of different types of land use through decomposition of the SAR backscattering into basic scattering mechanisms. The results of two target decomposition methods for three different data takes of polarimetric L-band were analysed and compared.

With vegetation development an increase of dipole scattering as well double bounce-interactions and a stronger influence of the secondary scattering processes was found. Vice versa the dominant portion of surface scattering on the bare fields decreases due to the growth of the plants. The various parts of the three scattering mechanisms are determined mainly through the influence of local incidence angle for several crops.

Einleitung

Eine Aufgabe der Fernerkundung ist es, umfassend und detailliert Informationen über die Objekte und Oberflächen der Erde zu erfassen. In der aktuellen Forschung nimmt dabei die Radarfernerkundung aufgrund ihrer relativen Atmosphären- und Witterungsunabhängigkeit, ihres Einsatzpotentials bei Tag und Nacht sowie in schwer zugänglichen Regionen eine bedeutende Stellung ein.

In der nachfolgend vorgestellten Arbeit soll als Teil des Forschungsprojektes TerraDew durch Zerlegung der Radarrück-

streuung in elementare Streumechanismen das Streuverhalten der Vegetation sowie unbedeckter Oberflächen untersucht werden. Die Rückstreuanteile verändern sich in Abhängigkeit von den inhärenten Eigenschaften der beleuchteten Oberflächen und Objekte, weshalb sich aus polarimetrischen Radardaten Informationen über diese Objekte ableiten lassen.

In dieser Untersuchung wird das Streuverhalten anhand polarimetrischer Parameter der Pauli- und Cloude-Dekompositionsprodukte mit statistischen Methoden analysiert. Dabei werden die abgeleiteten wirken-

den Streumechanismen *double bounce*, Volumenstreuung sowie Oberflächenstreuung bzw. ihre zur Gesamtrückstreuung beitragenden Streuanteile vergleichend für verschiedene Feldfrüchte bzw. ausgewählte Felder im Testgebiet gegenüber gestellt. Die Ergebnisse werden unter Einbeziehung raddarrückstreurelevanter Gelände- und Vegetationsmerkmale für die verschiedenen Zeitpunkte der Datenaufnahme interpretiert.

Bisher wurden mehrere Zielzerlegungsverfahren und Streumodelle außerdem mit dem Ziel entwickelt, Vegetationseigenschaften u. a. Einflussfaktoren aus Radardaten zu extrahieren. Dazu wird in dieser Arbeit mittels Regressionsanalysen weiterhin überprüft, welche Faktoren einen erkennbaren Einfluss auf die reellen Werte der polarimetrischen Parameter ausüben, um den Inversionsprozess zu vervollständigen (CLOUDE & POTTIER 1997).

1 Testgebiet und Datengrundlage

Das etwa 3 km × 3 km große Testgebiet befindet sich im Bayerischen Alpenvorland ca. 25 km südwestlich von München zwischen den Ortschaften Alling, Weßling sowie Gilching. Es ist durch ein flaches Relief gekennzeichnet und weist neben intensiv landwirtschaftlich genutzten Feldern, welche durch die Struktur einer Streifenflur geprägt sind, v.a. im Norden Wald- und Grünlandflächen auf.

Die Grundlage für die vorliegende Untersuchung bildeten voll polarimetrische, im L-Band des experimentellen SAR-Systems aufgezeichnete *single look complex* Daten in der *slant range* Geometrie vom 16.06.2000, 12:00, welche Teil der Datengrundlage des TerraDew Projektes sind, sowie vom 29.03.2000 und 26.07.2000. Für die Auswertung der Daten wurden wichtige Vegetations- und Oberflächenparameter, so u. a. die gravimetrische und volumetrische Bodenfeuchte sowie die -Rauhigkeit, die Vegetationshöhe und -Dichte verwendet, welche im Testgebiet während der Befliegungstermine erhoben wurden.

2 Stand der Forschung

2.1 Elementare Streumechanismen

Als ein Streuvorgang wird grundsätzlich die Transformation einer von der Antenne ausgesendeten in die gestreute Welle bezeichnet, wobei sich i. A. ihr Polarisationszustand ändert (HAJNSEK 2001). Bei homogenen und dichten, aber dielektrisch unterschiedlichen Medien findet die Streuung nur auf deren Grenzfläche statt, so dass in diesem Fall von einer Oberflächenstreuung gesprochen werden kann (SCHMULLIUS 1992). *Double bounce* stellt eine besondere Form der Oberflächenstreuung dar, da in diesem Fall das Radarsignal zweifach an unterschiedlich orientierten Flächen (*dipplane*) reflektiert wird. Volumenstreuungsprozesse finden statt, wenn die einzelnen Streuzentren in den unter der Oberfläche eines Mediums gelegenen Schichten nicht homogen verteilt sind bzw. unterschiedliche dielektrische Eigenschaften aufweisen. Ein Teil der ausgesendeten Wellen dringt dabei in das inhomogene Medium ein und wird an den Inhomogenitäten zurückgestreut (KREMMERS 1997).

2.2 SAR Polarimetrie

Die von SAR-Systemen beleuchteten, natürlich vorkommenden Objekte weisen in der Regel eine komplexe Geometrie sowie inhomogene Streueigenschaften auf. Dennoch werden diese als ideale Punktstreuer definiert und von benachbarten Streuern als unbeeinflusst betrachtet (JOHLIGE 1998). Zur Beschreibung von Punktzielen sowie ihrer Streueigenschaften wird die komplexe Streumatrix [S] verwendet.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}$$

Im Falle monostatischer abbildender SAR-Systeme wird eine Symmetrisierung von [S] bewirkt: $S_{hv} = S_{vh}$ (CLOUDE 1997).

Da i. d. R. die von einem Radar aufgelöste Fläche sich aus vielen individuellen Streuern zusammensetzt, besteht die gemessene Streumatrix [S] aus der kohärenten Summe

aller individuellen $[S]_r$ -Matrizen der einzelnen Streuzentren in einer Auflösungszelle. Daraus ergibt sich bei Flächenzielen die Rückstreuintensität durch deren Mittelwert. Zur Untersuchung der Streuwirkungen statistisch verteilter Streuer wird der komplexe Streuvektor \mathbf{k} verwendet (BÖRNER 2000), mit welchem die Streumatrix alternativ dargestellt werden kann. Aus dem dreikomponentigen Streuvektor in der Pauli-Basis erhält man durch Mitteln der komplexen Elemente die polarimetrische 3×3 Kohärenz-Matrix $[T]^3$

$$[T] = \langle \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{k}_p^* \rangle^T$$

welche die vollständige Information über die polarimetrischen Streueigenschaften eines Ziels enthält und zur quantitativen Beschreibung von Teilstreuern (CLOUDE 1997) verwendet wird.

2.3 Polarimetrische Zielzerlegung nach Pauli und Cloude

Im Ansatz der Pauli-Dekomposition wird die Streumatrix $[S]$ als eine komplexe Summe von elementaren 2×2 Matrizen dargestellt, denen deterministische Streumechanismen zugeordnet werden können.

$$[S] = a \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + c \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$$

Die komplexen Amplituden a , b , c und d dienen zur Gewichtung der einzelnen Streubeiträge. Die Pauli-Matrizen können als physikalische Streueigenschaften von Objekten interpretiert werden. Der mit „ a “ multiplizierte Term zeigt isotrope Oberflächenstreuung von relativ glatten Oberflächen an, wobei $S_{hv} = S_{vh} = 0$. Die zweite Matrix steht für isotrope *double bounce*-Reflexion von sog. *dihedral*-Objekten bzw. Winkelreflektoren. Dabei werden die kopolarisierten Rückstreuanteile in ihren orthogonalen Zustand invertiert: $S_{hh} = -S_{vv}$. Der dritte Term in der Pauli-Dekomposition kennzeichnet den Prozess der Vo-

lumenstreuung $2 S_{hv}$, wobei $S_{hh} = S_{vv} = 0$ (HAJNSEK 2001). Durch die Symmetrie der Streumatrix im Falle der Rückstreuung von einem reziproken Streuer ist $d = 0$, weshalb der vierte Streumechanismus nicht erscheint (RUDOLF 2000).

Die Cloude-Dekomposition zählt zu den eigenvektor-basierten Zielzerlegungsverfahren. In diesem Dekompositionsansatz wird die Diagonalform der 3×3 Kohärenzmatrix $[T]$ in eine nicht-kohärente Summe unabhängiger Kohärenz-Matrizen $[T_n]$ zerlegt.

$$[T] = \sum_{n=1}^3 \lambda_n [T_n] \\ = \lambda_1 (\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_1^i) + \lambda_2 (\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_2^i) + \lambda_3 (\mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{e}_3^i)$$

Dabei stellt jede Matrix $[T_n]$ einen deterministischen Streuteil dar. Deren Gewichtung wird durch die reellen Eigenwerte $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$ gegeben, während die Eigenvektoren \mathbf{e}_n sich auf die Art des Streumechanismus beziehen. Durch Extraktion des größten Eigenwertes wird der dominante Streumechanismus bestimmt. Die Eigenvektoren der Kohärenzmatrix lassen sich durch unitäre Vektoren in allgemeiner Form mit fünf Winkeln darstellen.

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) e^{i\phi} \\ \sin(\alpha) \cos(\beta) e^{i\delta} \\ \sin(\alpha) \sin(\beta) e^{i\gamma} \end{bmatrix}$$

Der Alphawinkel identifiziert den Typ des wirkenden dominanten Streumechanismus und nimmt Werte in einem kontinuierlichen Wertebereich von 0° bis 90° an. Dem Wert von 0° entspricht dabei Oberflächenstreuung an einer isotropen Oberfläche. Bei $\alpha = 45^\circ$ findet Volumenstreuung an Dipol-Objekten statt. Geht der Wert von $\alpha > 45^\circ$ gegen 90° , finden *double bounce*-Streuprozesse an anisotropen *dihedral*-Objekten statt (CLOUDE & POTTIER 1997).

Zur Klassifikation polarimetrischer Daten wurde die Entropie H eingeführt, welche Informationen über die Anzahl der voneinander verschiedenen beteiligten Streumechanismen innerhalb einer Auflösungszelle liefert.

$$H = - \sum_{i=1}^{i=3} P_i \log_3 P_i$$

Die Entropie kann Werte im Intervall von Null, wenn nur ein einziger Streuprozess zum rückgestreuten Gesamtsignal beiträgt, bis Eins annehmen. Dann liegt eine völlige Depolarisation der einfallenden Welle vor, alle Eigenwerte sind $\neq 0$ bzw. tragen gleich stark zur Rückstreuung bei (CLOUDE & POTTIER 1995).

Um das Verhältnis der beiden kleineren Eigenwerte λ_2 und λ_3 zu bestimmen, wird die Anisotropie A eingeführt.

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}$$

Ist die Anisotropie hoch, spielt nur der zweite Streuprozess eine Rolle, d. h. $\lambda_3 \rightarrow 0$. Eine niedrige Anisotropie hingegen bedeutet, dass auch der dritte Streumechanismus an der Rückstreuung beteiligt ist. Hohe Entropie und hohe Anisotropie entsprechen dem Vorhandensein von zwei Streumechanismen mit gleicher Wahrscheinlichkeit (LEE & POTTIER 1999).

3 Ergebnisse

Für die Auswertung wurde mit den georeferenzierten Dekompositionsprodukten eine

Signaturanalyse von definierten AOI-Flächen, welche die statistischen Streumerkmale der untersuchten Felder bzw. Pflanzen in Form der polarimetrischen Parameter repräsentieren, durchgeführt.

3.1 Saisonale Rückstreu-mechanismen in der Cloude-Dekomposition

Die in Abb.1 dargestellten Parameter der Cloude-Dekomposition werden im folgenden für drei Zeitpunkte im Zeitraum März bis Juli 2000 betrachtet. Auf den im März zumeist noch unbestandenen Feldern findet mit einem Alphawinkel von $\sim 22^\circ$ bis $\sim 33^\circ$ ausschließlich dominante Oberflächenstreuung bei einer geringen bis mittleren Entropie und Anisotropie statt. Die Mittelwerte von $>0,3$ bis $\sim 0,5$ weisen darauf hin, dass neben der Oberflächenstreuung die sekundären Streuanteile nur gering zur Gesamtrückstreuung beitragen. Für die 5–15 cm hohen Wintergetreide- sowie Grünlandfelder gibt der Alphawinkel von 35° – 39° ebenfalls dominante Oberflächenstreuung an (LIEBESKIND 2002). Nur auf den mit Winter-raps bestandenen Feldern findet mit $\alpha > 50^\circ$ *double bounce* als dominanter Streuprozess

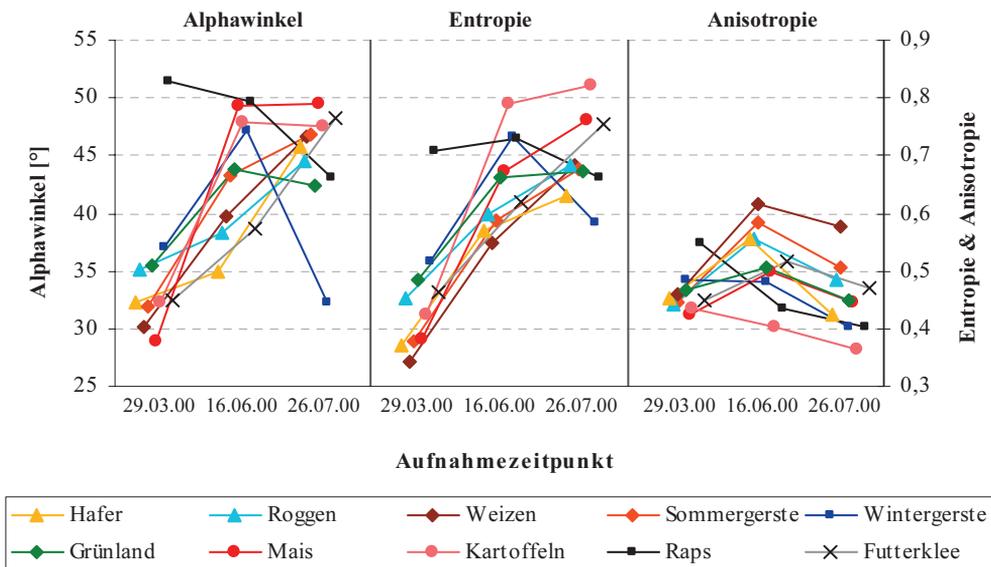


Abb. 1: Parameter der Cloude-Dekomposition für die Felder der untersuchten Feldfrüchte, gemittelt.

bei einer relativ hohen Entropie und Anisotropie statt. Beide Parameter geben an, dass auf diesen Feldern zumindest ein sekundärer Streuprozess wirksam ist.

Für die meisten untersuchten Feldfrüchte wurde mit dem Wachstum der Vegetation ein starker Anstieg des Alphawinkels und der Entropie bis Juni festgestellt. Dies weist auf einen höheren Beitrag der sekundären Streuprozesse bzw. auf eine Zunahme der Volumen- und *double bounce*-Streuanteile mit Ausprägung der spezifischen Vegetationsstrukturen hin. Nach Cloude findet mit Alphawerten von $\sim 40^\circ$ bis $\sim 50^\circ$ im Juni vorwiegend dominante Volumenstreuung statt, welche durch das Vegetationsvolumen hervorgerufen wird. Die mittlere bis hohe Entropie von $> 0,5$ bis $\sim 0,8$ deutet darauf hin, dass mindestens ein zweiter Streumechanismus an den Rückstrevorgängen beteiligt ist. Nur für wenige Felder gibt $\alpha \geq 50^\circ$ dominante *double bounce*-Interaktion an. Dies betrifft insbesondere Mais und Raps, aber auch einige im *near range* gelegene Getreidefelder. Auf Roggen-, Weizen- und Haferfeldern im *far range* trägt hingegen Oberflächenstreuung den stärksten Anteil zur Radarrückstreuung bei (LIEBESKIND 2002).

Mit Ausnahme der abgeernteten Wintergerste- und Rapsfelder zeigt die Entropie in Abb. 1 einen weiteren Anstieg bis Juli. Die Anisotropie nimmt hingegen für die überwiegend reifen Feldfrüchte generell niedrigere Werte als im Juni an. Der Alphawinkel steigt insbesondere auf den um 10–30 cm gewachsenen Futterklee- sowie auf Getreidefeldern im *far range* deutlich an. Die Rückstreuung der abgeernteten Felder sowie einzelner Getreidefelder im *near range* ist im Juli durch einen dominanten Oberflächenstreuanteil mit $\alpha < 40^\circ$ charakterisiert. Auf einigen z. B. mit Mais bestandenen Feldern findet mit $\alpha > 50^\circ$ *double bounce* als dominanter Streumechanismus statt. Für die meisten Felder jedoch gibt der Alphawinkel mit $\sim 40^\circ$ – 50° bei einer relativ hohen Entropie bzw. einer vergleichsweise niedrigen Anisotropie dominante Volumenstreuung u. a. aufgrund inkohärenter Streuvorgänge an. Dies weist darauf hin, dass der schwächere sekundäre Streumechanismus an Bedeutung

für die Rückstreuung der reifen Feldfrüchte gewinnt bzw. alle elementaren Streumechanismen signifikant zum Radarecho beitragen.

3.2 Dominante und sekundäre Streuanteile in der Pauli-Dekomposition

Für den Zeitpunkt der Datenaufnahme am 29.03.00 wurde in der Pauli-Dekomposition auf unbestandenen Feldern ebenfalls ein dominanter Oberflächenstreuanteil von > 53 – 55% in Abb. 2 festgestellt, wobei die mittleren Anteile der *double bounce*- und Volumenstreuprozesse nur relativ gering zur Rückstreuung beitragen. Mit Winterroggen und -Gerste bestandene Felder zeigen etwas niedrigere Oberflächenstreuanteile von $\sim 50\%$. Ausschließlich auf den Rapsfeldern dominiert *double bounce* mit einem Streuanteil von $\sim 40\%$ in Abb. 2 die stattfindenden Rückstreuprozesse. Dabei entspricht ein annähernd gleich starker Oberflächenstreuanteil von 38% der Aussage der Entropie bei Cloude. Volumenstreuung stellt im März mit ca. 15 – 20% den schwächeren sekundären Streuanteil dar.

Analog zum Anstieg des Alphawinkels ist in Abb. 2 zu sehen, dass die Oberflächenstreuung durch einen zumeist stark abnehmenden Streuanteil bis Juni charakterisiert ist. Im Gegenzug steigen sowohl die *double bounce*- als auch die Volumenstreuanteile mit Ausbildung der Vegetationsstrukturen mehr oder weniger stark an. Nichtsdestotrotz stellen im Juni meist Oberflächenstreuung die dominanten und Volumenstreuung, bis auf die Kartoffelfelder, die kleinsten Rückstreuanteile dar. Im Vergleich zu März bleibt Oberflächenstreuung auf einigen Getreidefeldern im *far range* ein relativ gleich starker Streuanteil. *Double bounce* stellt nach Pauli vorwiegend den stärkeren sekundären Rückstreuprozess dar. Nur auf einigen Mais- sowie Getreidefeldern im *near range* dominiert er mit $\sim 40\%$ die stattfindenden Rückstrevorgänge (LIEBESKIND 2002). Hierin gelangen beide Dekompositions-Methoden zu einem ähnlichen Ergebnis.

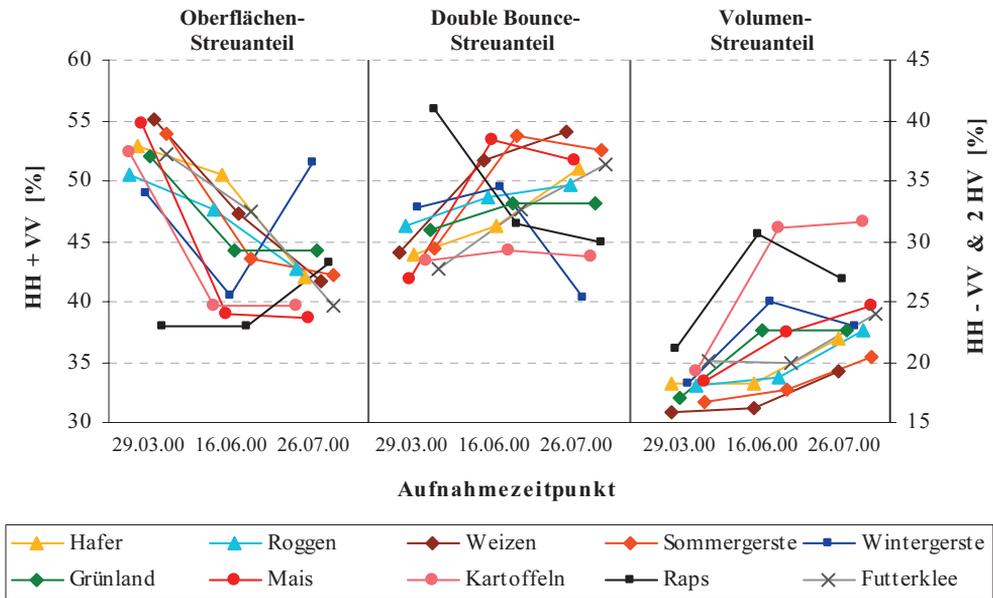


Abb. 2: Genormte mittlere Streuanteile der Pauli-Dekomposition für die untersuchte Vegetation.

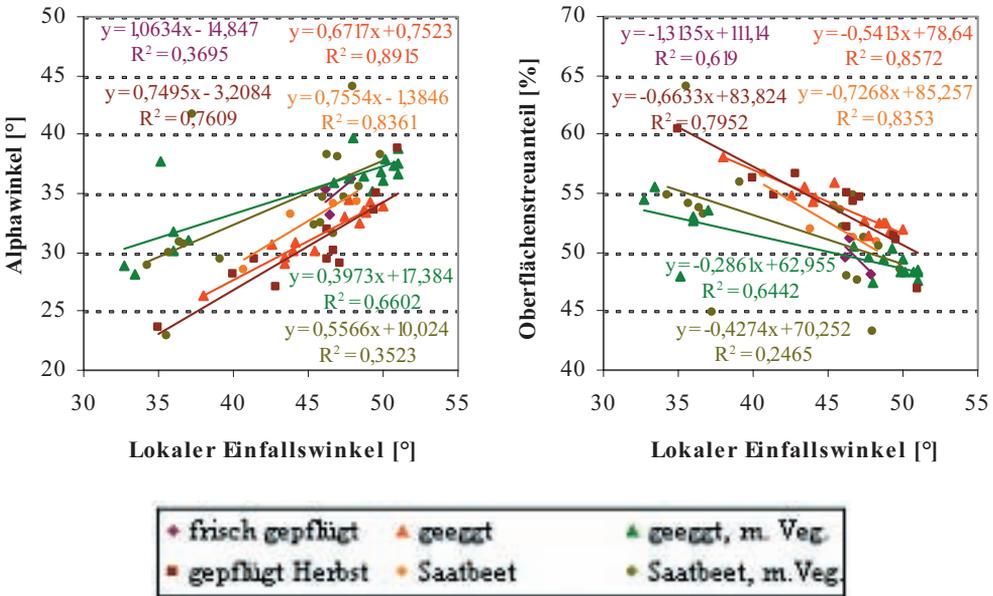


Abb. 3: Untersuchung des Einflusses des lokalen Einfallswinkels am 29.03.2000.

Das Rückstreuverhalten von Kartoffeln, den nahezu reifen Raps- und Wintergerstefeldern, welche die höchsten Volumenstreuanteile z. T. > 30% anzeigen, sowie von Mais ist durch relativ geringe Differenzen

zwischen den dominanten und sekundären Streuanteilen gekennzeichnet.

Der Oberflächenstreuanteil bei Pauli nimmt in Abb. 2 für die meisten Feldfrüchte bis Juli ab und stellt mit etwa 40–52% einen

schwach dominanten Streumechanismus dar. Abgeerntete Raps- und Wintergerstefelder zeigen einen gegenläufigen Trend. *Double Bounce* bildet auch im Juli hauptsächlich den stärkeren sekundären Streuprozesses. Nur auf wenigen Mais- und Sommergerstefeldern trägt er mit einem dominanten Anteil zur Rückstreuung bei. Abb. 2 zeigt, dass mit der Abreife vieler Feldfrüchte der Anteil der Volumenstreuung weiter zunimmt, u. a. da die HV-polarisierte Komponente entscheidend durch geneigte Stiele (BARONTI et al. 1995) bzw. inhomogen verteilte Streuelemente bestimmt wird. Mit einem mittleren Streuanteil von max. 30% trägt Volumenstreuung mit der Ausnahme von Kartoffeln den relativ geringsten Anteil zur Rückstreuung bei. Somit sind alle deterministischen Streuprozesse wesentlich an der Gesamtrückstreuung im Juli beteiligt.

3.3 Einfluss des lokalen Einfallswinkels und der Rauigkeit im März

Die Werte der polarimetrischen Parameter deuten im März auf eine hohe Abhängigkeit des Streuverhaltens unbedeckter bzw. nur mit niedriger Vegetation bestandener Felder vom lokalen Einfallswinkel hin. Diese gestaltet sich so, dass mit einer Zunahme des Einfallswinkels eine Abnahme des Oberflächenstreuanteils bzw. ein Anstieg des Alphawinkels verbunden ist. Demzufolge spielt im *far range* die Oberflächenstreuung eine geringere Rolle für die Rückstreuung; stattdessen sind in diesem Bereich stärker Volumen- oder *double bounce*-Streuprozesse wirksam.

Die polarimetrischen Parameter zeigen dabei in Abb. 3 auf unbestandenen gepflügten Feldern mit einer höheren Rauigkeit, welche relativ hohe Rückstreuwerte in der HV-Polarisation bewirken (BARONTI et al. 1995), tendenziell eine geringere Abhängigkeit vom lokalen Einfallswinkel als auf unbestandenen geeggen oder Saatbeetfeldern mit einer geringeren Rauigkeit. Im Frühjahr wurde insbesondere im L-Band ein hoher Einfluss des lokalen Einfallswinkels auf

die Rückstreuung beobachtet, da Oberflächen im L-Band glatter erscheinen (SKRIVER et al. 1999).

3.4 Einfluss des lokalen Einfallswinkels auf reifes Getreide sowie Grünland

Das Streuverhalten von Sommergerste, Weizen und Roggen, welche sich Mitte Juni im Stadium der Grünreife befinden, zeigt in Abb. 4 eine relativ hohe Abhängigkeit vom lokalen Einfallswinkel. So zeigen Felder im *far range* höhere Oberflächen- sowie kleinere *double bounce*-Streuanteile bei Pauli an. Mit abnehmendem lokalen Einfallswinkel steigt der Alphawinkel jedoch an. D. h. im *near range* stellen hauptsächlich Volumenstreuung sowie *double bounce* bei Sommergerste die dominanten Rückstreuanteile in der Cloude-Dekomposition dar. Auf Roggen- und Sommergerstefeldern im *near range* nimmt die Anisotropie im Juni höhere Werte an, was auf einen geringeren Einfluss des schwächeren sekundären Streuanteils hinweist.

Der Einfluss des lokalen Einfallswinkels auf das Streuverhalten ist im Juli mit der Ausnahme von Sommergerste, welche gegenüber anderen untersuchten Getreidearten geringere Vegetationshöhen von 50–80 cm aufweist, sowie von Grünland aufgrund eines hohen inkohärenten Volumenstreuanteils (SKRIVER et al. 1999) generell niedrig. Die vorwiegend reifen Feldfrüchte bewirken einen hohen Rückstreuanteil der HV-Komponente sowie relativ starke Streubeiträge der sekundären deterministischen Streumechanismen.

Für die Grünlandflächen gibt der Alphawinkel in Abb. 4 mit Werten $< 35^\circ$ einen dominanten Oberflächenstreuanteil im *near range* an. Für die Felder im *far range* hingegen zeigt er dominante Volumenstreuung bei einer relativ hohen Entropie an. Im *near range* weist die geringere Entropie auf kleinere Beiträge der sekundären Streuprozesse hin. Demzufolge wird im *near range* die Rückstreuung von Grünlandflächen (bei Vegetationshöhen von 10–30 cm) stärker durch den Boden beeinflusst.

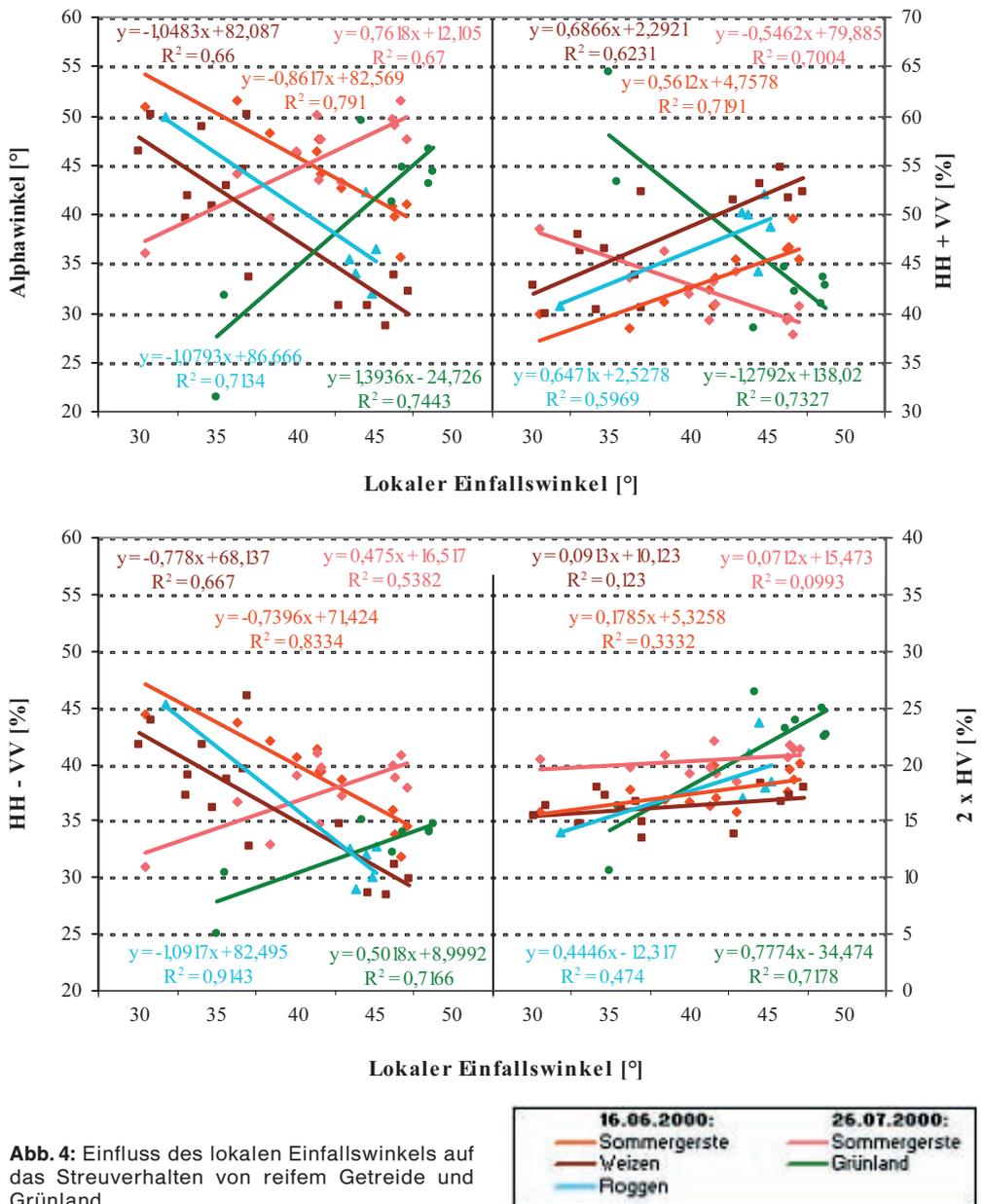


Abb. 4: Einfluss des lokalen Einfallswinkels auf das Streuverhalten von reifem Getreide und Grünland.

3.5 Der Einfluss der Vegetationsstruktur auf die Rückstreuphänomene

Die Rückstreuung von Wintertraps im Frühjahr sowie von einigen untersuchten Maisfeldern ist durch dominante *double bounce*-Streuteile gekennzeichnet. Traps weist

im März laut Groundtruth-Daten einen relativ niedrigen Bodenbedeckungsgrad von ~40% bzw. Mais von ±50% auf. Aufgrund von Interaktion der Radarwellen zwischen dem Boden und den kräftigen aufrechten Hauptsprossen, welche eine Abschwächung der VV-Polarisation bewirken

(SKRIVER et al. 1999), wird eine dominante *double-bounce*-Streuung im L-Band hervorgerufen (DE MATTHAEIS et al. 1994).

Getreide, welches sich am 16.06.00 im Stadium der Grünreife befindet, und einen hohen Bodenbedeckungsgrad von $\sim 82\text{--}97\%$ aufweist, verursacht im *near range* nach Cloude häufig dominante Volumenstreuung bzw. im *far range* vorwiegend dominante Oberflächenstreuung. Bei relativ geringen Vegetationsdichten konnten im *far range* tendenziell höhere Alphawinkelwerte bzw. Volumenstreuteile bei Pauli u. a. auf Hafer- und Gerstenfeldern festgestellt werden.

Im Juli befinden sich die meisten untersuchten Getreidearten im Stadium der Gelbreife, welche bei Wintergerste bereits im Juni einsetzt. Die Gelbreife ist u. a. durch trockenere Vegetationsbestände, gebogene Ähren sowie z. T. geneigte Stiele gekennzeichnet. Aufgrund des reduzierten Wassergehaltes kann das L-Band tiefer in das Vegetationsvolumen eindringen. Nach Cloude trägt auf Feldern mit reifem Getreide Volumenstreuung den dominanten Anteil hauptsächlich von der Vegetation zur Rückstreuung bei, wobei die Getreideähren im fortgeschrittenen Reifestadium ebenso einen signifikanten Einfluss auf die Radar-rückstreuung ausüben. Die direkte Bodenreflexion nimmt dagegen kaum Anteil an der Rückstreuung (STILES et al. 2000, COOKMARTIN et al. 2000). Reife Rapspflanzen, deren bis zu 10 cm langen Schoten im Juni vollständig ausgebildet sind, bewirken u. a. wegen ihrer inhomogenen Vegetationsstruktur mit zufällig angeordneten Vegetationselementen hohe bzw. dominante Volumenstreuteile. Die Mikrowellen werden im L-Band vorwiegend an geneigten Pflanzenstielen und großen Blättern gestreut (BARONTI et al. 1995). Kartoffelpflanzen stellen aufgrund ihrer Staudenform eine komplexe Vegetationsschicht mit großflächigen Laubblättern dar. Diese verursachen neben den krautigen Pflanzenstielen eine hohe HV-Komponente (SKRIVER et al. 1999) bzw. einen signifikanten Volumenstreuteil.

Die hohe Entropie reifer Feldfrüchte sowie der breitblättrigen Kartoffel- und Mais-

pflanzen weist auf das Wirken aller drei deterministischen Streumechanismen bzw. auf einen starken Einfluss der sekundären Streuteile hin.

Schlussfolgerungen

Für die Ergebnisse der Pauli-Dekomposition ist ein relativ hoher Anteil der Oberflächenstreuung über die gesamte untersuchte Vegetationsperiode kennzeichnend. In Bezug auf die saisonale Entwicklung sowie hinsichtlich des Einflusses des lokalen Einfallswinkels verhält sich dieser Anteil tendenziell in Abb. 5 äquivalent zum Alphawinkel in der Cloude-Dekomposition.

Das Verhältnis der einzelnen Streuteile wird in beiden Dekompositionen ähnlich wiedergegeben. So zeigen Felder mit einer hohen Entropie relativ gleich starke prozentuale Streuteile aller Streumechanismen bei Pauli. Ein großer Unterschied zwischen beiden Ansätzen besteht im Anteil der Volumenstreuung, welcher nach Cloude auf vegetationsbedeckten Feldern eine wesentliche Rolle für die stattfindenden Streuprozesse spielt, nach Pauli jedoch über die ge-

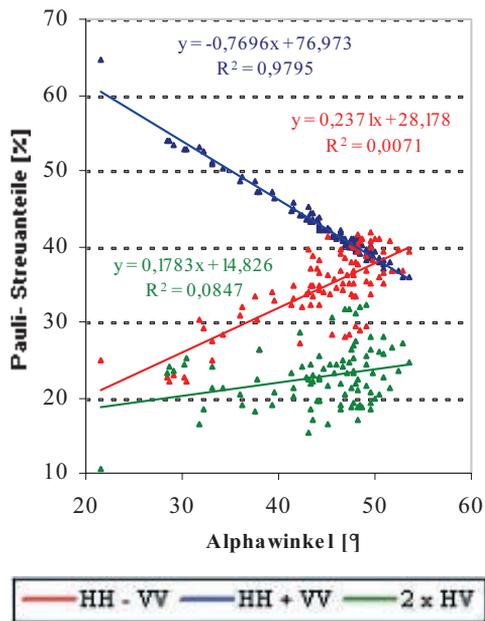


Abb. 5: Regression der Pauli-Streuteile mit dem Alphawinkel für alle Felder am 26. 07. 00.

samte Vegetations-Periode hinweg nur relativ gering zur Rückstreuung beiträgt. Dies ergibt sich u. a. aus der Berechnung des Volumenstreuanteils in der Pauli-Dekomposition mit der Formel $2 \times HV$. Die Zielzerlegung nach Pauli beruht auf der Trennung von drei idealen Streuteilen, weshalb sie zur theoretischen Beschreibung des Streuverhaltens von Punktzielen geeignet ist.

Der lokale Einfallswinkel erwies sich in der vorliegenden Untersuchung als der wichtigste Einflussfaktor für die stattfindenden Streumechanismen insbesondere im März auf unbestandenen Feldern mit einer geringeren Oberflächenrauigkeit. Für grünes reifendes Getreide gestaltet sich der Einfluss des lokalen Einfallswinkels im Gegensatz zum Frühjahr durch höhere Oberflächenstreuanteile im *far range* sowie größere Volumen- und *double bounce*-Anteile im *near range*. Mit dem Einsetzen der Gelbreife nimmt die Abhängigkeit des Streuverhaltens vom lokalen Einfallswinkel ab. Reife Feldfrüchte bewirken im Juli zumeist hohe inkohärente Anteile der Volumenstreuung sowie drei ähnlich stark wirkende Streumechanismen.

Ausblick

Um weitere wichtige Einflussgrößen abzuleiten bzw. ihre Bedeutung für die Radarrückstreuung herauszufinden, kann das Streuverhalten unter Berücksichtigung des Faktors lokaler Einfallswinkel analysiert werden. Zu untersuchen wären dabei insbesondere die Bestandesdichte bzw. der Bodenbedeckungsgrad sowie auch die Pflanzenhöhe, da am Beispiel einzelner Getreidefelder Anzeichen eines Einflusses dieser Größen auf Art und Anteile der wirkenden Rückstreuemechanismen erkennbar waren (LIEBESKIND 2002).

Zur Erhöhung des Informationsgehaltes von polarimetrischen SAR-Daten können zum einen verschiedene Frequenzen zur Datenaufnahme verwendet, zum anderen verschiedene Methoden zur Extraktion des Streuverhaltens bzw. weiterer polarimetrischer Parameter sowie Daten mehrerer Zeitpunkte kombiniert werden. So wird bei-

spielsweise durch Bildung eines kombinierten Merkmalsraumes aus Entropie und Anisotropie die Trennbarkeit und Identifizierung von Objekten der Erdoberfläche verbessert. Werden den extrahierten Streumechanismen natürliche Objekte zugeordnet, kann eine unüberwachte Klassifizierung durchgeführt werden (HELLMANN 2000).

Umfangreichere Kenntnisse von den wirkenden Streumechanismen an vorkommenden Vegetationsarten und Landnutzungen sowie den wichtigen Einflussgrößen erlauben exaktere Modelle, wodurch wiederum in einem nächsten Schritt Informationen über die Eigenschaften der Objekte und damit über die Zielobjekte direkt aus den aufgezeichneten Radarbildern abgeleitet werden können.

Danksagung

Dank gebührt dem Deutschen Ministerium für Bildung und Forschung (FKZ 50EE 0035) für die freundliche Unterstützung des TerraDew-Projektes sowie der DLR, SPARC und QuinetIQ für die Bereitstellung der E-SAR Daten.

Literatur

- BARONTI, S. et al., 1995: SAR polarimetric features of agricultural areas. – *International journal of remote sensing* **16** (14): 2639–2656.
- BÖRNER, T., 2000: Kohärente Modellierung von Radarrückstreuung für die Anwendung in polarimetrischer SAR Interferometrie. – 1. Aufl., 123 S., DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, Köln.
- CHIU, T. & SARABANDI, K., 2000: Electromagnetic scattering from short branching vegetation. – *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* **38** (2): 911–924.
- CLOUDE, S.R., 1997: The physical interpretation of eigenvalue problems in optical scattering polarimetry. – *Proceedings of SPIE'97*, **3121** (polarization: measurement, analysis and remote sensing, SPIE's 42nd Annual Meeting): 88–99.
- CLOUDE, S.R. & POTTIER, E., 1997: An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. – *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* **35** (1): 68–78.

- CLOUDE, S.R. & POTTIER, E., 1995: Concept of polarization entropy in optical scattering. – *Optical engineering* **34** (6): 1599–1610.
- COOKMARTIN, G. et al., 2000: Modeling microwave interactions with crops and comparison with ERS-2 SAR observations. – *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* **38** (2): 658–669.
- HAJNSEK, I., 2001: Inversion of surface parameters using polarimetric SAR. – 1. Aufl., 170 S., DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, Köln.
- HELLMANN, M., 2000: Classification of fully polarimetric SAR data for cartographic applications. – 1. Aufl., 156 S., DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, Köln.
- HOLECZ, F., 1993: Postprocessing von SAR-Satellitenbildern. – 1. Aufl., 149 S., Dept. of Geography, Univ. Zürich.
- JOHLIGE, A., 1998: Untersuchung zum Informationsgehalt experimenteller SIR-C/X-SAR Daten für forstliche Anwendungen am Beispiel der Testgebiete Oberpfaffenhofen und Bayrischer Wald. – 1. Aufl., 142 S., Hochschulschrift, Univ. München.
- KREMMERS, T., 1997: Untersuchung zum Anwendungspotential multitemporaler ERS-1 und JERS-1 Daten für die Kartierung und Beobachtung von Waldflächen in Mitteleuropa. – 1. Aufl., 184 S., Hochschulschrift, Univ. Freiburg (Breisgau).
- LIEBESKIND, P., 2002: Eine vergleichende Analyse der Pauli- und Cloude-Dekompositionsprodukte zur Ableitung der Streumechanismen aus vollpolarimetrischen E-SAR Daten. – Dipl.-Arbeit, Inst. f. Geogr., FSU Jena.
- DE MATTHAEIS, P. et al., 1994: Effect of scattering mechanisms on polarimetric features of crops and trees. – *International Journal of Remote Sensing* **15** (14): 2917–2930.
- POTTIER, E. & LEE, J.S., 1999: Application of the « $H / A / \square$ » polarimetric decomposition theorem for unsupervised classification of fully polarimetric SAR data based on the Wishart distribution. – CEOS SAR workshop, 26.–29. Oct. 1999.
- RUDOLF, H., 2000: Increase of information by polarimetric radar systems. – 1. Aufl., 122 S., IHE (Inst. f. Hochfrequenztechnik), Univ. Karlsruhe.
- SCHMULLIUS, C.C., 1992: Radarfernerkundung landwirtschaftlicher Flächen mit einem flugzeuggetragenen L-, C- und X- Band Scatterometer. – 1. Aufl., 111 S., Fachbereich Geowiss., FU Berlin.
- SKRIVER, H. et al., 1999: Multitemporal C- and L-band polarimetric signatures of crops. – *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* **37** (5): 2413–2428.
- STILES, J.M. et al., 2000: Electromagnetic scattering from grassland – part II: measurement and modelling results. – *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* **38** (1): 349–356.

Anschriften der Autoren:

Dipl.-Geogr. PIA LIEBESKIND
Am Weißen Stein 17, D-09117 Chemnitz
Tel.: 0341-46 33 678
e-mail: liebeskind2@yahoo.de

Dipl.-Geogr. TANJA RIEDEL
Prof. Dr. CHRISTIANE C. SCHMULLIUS
Friedrich-Schiller-Universität Jena
Institut für Geographie
Löbdergraben 32, D-07743 Jena
Tel.: 03641-948 877 & 03641-948 875
e-mail: Tanja.Riedel@uni-jena.de
e-mail: Christiane.Schmullius@uni-jena.de

Manuskript eingereicht: Februar 2004
Angenommen: August 2004