

Aus dem Institut für Technologie und Biosystemtechnik

Wolfgang Paul
Hermann Speckmann

Radarsensoren : neue Technologien zur präzisen Bestandsführung ; T. 2, Messung der Bestandsdichte und Ausblick

Veröffentlicht in: Landbauforschung Völkenrode ; 54(2004)2:87-102

Braunschweig
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
2004

Radarsensoren: Neue Technologien zur präzisen Bestandsführung

Teil 2: Messung der Bestandsdichte und Ausblick

Wolfgang Paul und Herrmann Speckmann¹

Zusammenfassung

In der Radartechnik wurden in den letzten Jahren bemerkenswerte Fortschritte hin zu kleinen Geräten mit äußerst geringen Strahlungsstärken erreicht. Solche modernen Radarsysteme bieten die Möglichkeit, Daten über den Abstand, die Geschwindigkeit und die Eigenschaften eines Objektes berührungslos zu erfassen. Insbesondere die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in der Automobiltechnik mit ihren enormen Stückzahlen lassen diese Sensoren immer preiswerter und leistungsfähiger werden. Für die Landtechnik werden deshalb diese sich entwickelnden Technologien im Sinne der Nutzung für eine präzise Pflanzenproduktion evaluiert.

Im zweiten Teil des Beitrags wird insbesondere auf die Möglichkeiten zur Messung der Bestandsdichte eingegangen. Im Gegensatz zur Messung der Bodenfeuchte können hier zwei Reflexionsebenen auftreten: der Übergang Luft / Bestand und der Übergang Bestand / zweiter Reflektor. Der zweite Reflektor kann bei Bestrahlung senkrecht von oben (Nadirposition) der Boden oder bei waagerechter Betrachtung (parallel zur Bodenoberfläche, Parallelposition) ein idealer Reflektor (Blechspiegel) sein. In beiden Fällen ergibt sich eine ähnliche Bilanz der Einflüsse auf das Radarsignal, sodass die Dichte des Pflanzenmaterials im Radarkegel gemessen werden kann.

Neben zahlreichen Beispielen für die Bestimmung der Bestandsdichte in unterschiedlichen Kulturen basierend auf Reflexions- oder Transmissionsmessungen wird auch auf die Aussagefähigkeit der kontinuierlichen Messung der Bestandshöhe hingewiesen. Nicht nur das Entwicklungsstadium sondern auch gestresste und deshalb zurückgebliebene Areale lassen sich so leicht erkennen. Weitere Messmöglichkeiten für eine vergrößerte Laufzeit bei geringer Bestandsdichte oder für den Einsatz in Erntemaschinen werden abschließend vorgestellt.

Schlüsselworte: Radar, Sensoren, Bestandsdichte, Rückstreuintensität, Laufzeit

Abstract

Radar sensors: emerging technologies for precision farming

Part 2: Plant density measurements and conclusions

During the last years there has been achieved remarkable progress in radar technology in the sense of small modules with very low radiation. Such modern radar systems offer the possibility to collect data on distance, speed and dielectric characteristics of an object in a non contact mode. Especially the numerous applicability in car industry and car safety systems leads to high performance and in conclusion to high production numbers and to low prices. In agricultural engineering these emerging technologies have to be evaluated in the sense of precision farming.

In the second part of this paper especially the possibilities of measuring the crop density are focused. In contrast to measuring soil humidity two interfaces of reflection will occur: the air / crop interface and the crop / soil interface. The second reflector can, instead of soil (looking from vertical or nadir position), also be an ideal reflector (metal plate as mirror) when looking in horizontal direction. In both cases the balance of influences is quite similar. So the density of plant material within the radar beam can be assessed in both set-ups.

Various examples for monitoring plant density for various crops based on measurements of reflection as well as on transmission are given. Also the continuous measurement of crop height contain valuable information. Not only the stadium of development but also stressed and hence retarded areas are clearly been seen. In conclusion, further hints are given for measuring the enlarged time of flight especially in sparse crop density or for the possibilities of measurements within machines.

Keywords: Radar, sensors, crop density, reflection intensity, time of flight

¹ Institut für Technologie und Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig; Leiter: Prof. Dr.-Ing. Axel Munack.
E-Mail: wolfgang.paul@fal.de
hermann.speckman@fal.de

4 Bestimmung von Bestandsdichten

4.1 Messpositionen und Bilanz der Einflüsse

Während bei der Erfassung von Bodeneigenschaften üblicherweise senkrecht von oben aus Nadirposition gemessen wird, ist in Pflanzenbeständen sowohl eine Messung senkrecht von oben als auch bei ausreichend hohem Bestand eine seitliche Messung parallel zur Erdoberfläche möglich (Abb. 20). In beiden Fällen können zwei Reflexionen auftreten. Die erste Reflexion geschieht an der ersten Grenzschicht beim Übergang aus dem Luftraum in den Bestand (z. B. der oberen Pflanzendecke oder

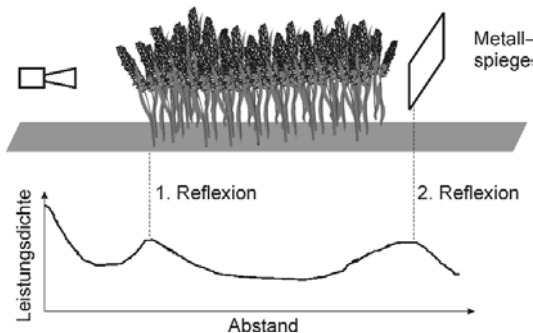


Abb. 20: Parallelposition zur Messung der Bestandsdichte

der seitlichen Schnittkante). Wegen der meist geringen Gesamtpermittivität des Bestandes (hoher Luftanteil im Bestandsvolumen) ist mit einem hohen Anteil an Transmission am ersten Übergang zu rechnen. Dieser Transmissionsanteil an der ausgesendeten Energie wird vom Pflanzenbestand gestreut und gedämpft. Ein großer Anteil erreicht jedoch die zweite Reflexionsfläche, um dort von der Bodenoberfläche oder einem Metallspiegel reflektiert zu werden und nach erneutem Durchlaufen der Pflanzenschicht zurück zur Antenne zu gelangen.

Die in der Radargleichung zu berücksichtigenden Bilanzinflüsse, die sowohl für Messungen aus Nadirposition als auch für Messungen aus Parallelposition in gleicher Struktur angeordnet sind, sind in Abb. 21 angegeben.

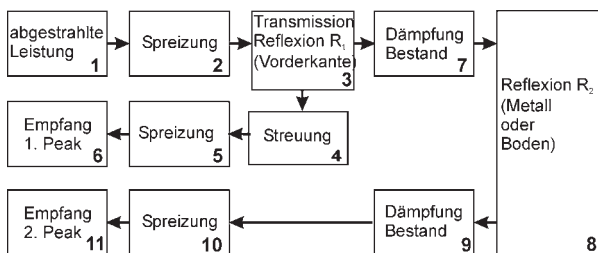


Abb. 21: Messeffekte bei der Bestimmung der Bestandsdichte laut Radargleichung

Man erkennt auch hier, dass grundsätzlich zwei Peaks in unterschiedlichem Abstand mit unterschiedlicher Beeinflussung als Empfang zu erwarten sind. Der erste Peak mit kurzem Weg resultiert aus der Reflexion an der Bestandsoberfläche (bzw. der Vorderkante des Bestandes). Der in entsprechend größerer Entfernung liegende zweite Peak resultiert aus der Reflexion an der Bodenoberfläche (bzw. des Metallspiegels) nach Hin- und Rücklauf durch den Bestand.

Im Allgemeinen ergeben sich aus der Radargleichung (Abb. 21) folgende Beziehungen für die **erste Reflexionsebene**:

$$P6^1 = P1 - P2 - Ref3 - S4 - P5$$

Wird anstelle des Bestandes ein Blech zur Reflexion verwendet, gilt

$$P6^{Blech} = P1 - P2 - P5$$

Aus der Differenz zwischen Blech und Bestand wird eine Beziehung für die aus der Bestandsdichte resultierende Gesamtreflexion, die sich aus Reflexion und Streuung an der Bestandsoberfläche (z. B. Schnittkante) in Empfangsrichtung ergibt, wobei die Reflexion Ref3 und die Streuung S4 zu einer Größe ‚Reflexionsverlust an der Oberfläche‘ RefO oder transformiert als Reflexionsfaktor R_0 zusammengefasst sind:

$$P6^{Blech} - P6^1 = \Delta = RefO \quad \text{oder} \quad R_0 = 10^{-\Delta/10}$$

In Abb. 22 ist diese Beziehung dargestellt, aus der folgt: je dichter der Bestand, desto geringer ist der messbare Reflexionsverlust Δ . Im Normalfall ist der Reflexionsfaktor eher klein, was zu einem hohen Verlust oder einer guten Auflösung des ersten Peaks führt.

Je nach Frequenz ist jedoch danach zu fragen, ob diese Reflexion an der Oberfläche des Bestandes eher eine Funktion der durchschnittlichen Permittivität ϵ des Bestandes (bei niedriger Frequenz) oder eher eine Funk-

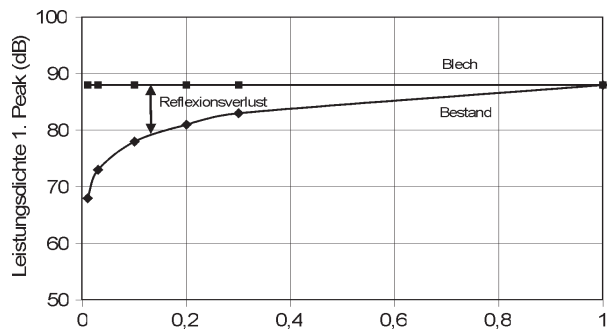


Abb. 22: Verlust durch Reflexion und Streuung an der Vorderkante eines Bestandes

tion der anteiligen Reflexions-Teilflächen σ (Stängel + Blattflächen orthogonal zum einfallenden Radarstrahl bei hoher Frequenz) ist. In beiden Fällen ist die Reflexion jedoch eine Funktion der Bestandsdichte.

Für die **zweite Reflexionsebene** gilt bei einer verlustbehafteten Reflexion am Boden:

$$P11^1 = P1 - P2 - \text{Trans3} - D7 - \text{Ref8} - D9 - P10$$

(Messung aus Nadirposition)

Im Falle einer zweiten Reflexion an einem ausreichend großem Blechspiegel wird:

$$P11^2 = P1 - P2 - \text{Trans3} - D7 - D9 - P10$$

(Messung aus Parallelposition)

Bei einer Messung in Luft mit Blechspiegel im Abstand des 2. Peaks ergibt sich wegen

$$D7 = D9 = \text{Trans3} = \text{Ref8} = 0$$

für die rückgestreute Energiedichte

$$P11^3 = P1 - P2 - P10$$

(Messung mit Blechspiegel)

Die Differenzen aus diesen drei Messungen ergeben ein Maß für die Bestandsdichte, entweder für Messungen aus Parallelposition

$$P11^3 - P11^2 = \Delta^{32} = \text{Trans} + 2D$$

oder für Messungen aus Nadirposition

$$P11^3 - P11^1 = \Delta^{31} = \text{Trans} + 2D + \text{Ref8}$$

Im letzten Fall kommt zum Energieverlust resultierend aus der Bestandsdichte noch ein weiterer Anteil resultierend aus dem Reflexionsverlust am Boden.

Da je nach Bestandsdichte die Verluste aus Transmission und Dämpfung gleichgerichtet sind (je geringer die Reflexion an der Vorderkante, desto geringer die Transmissionsverluste und desto geringer die Dämpfungsverluste) lassen sich Transmission und Dämpfung als Funktion der Bestandsdichte zusammenfassen (Abb. 23).

Statt obiger Kalibrierung mit Bodenblech kann für Nadirmessungen auch eine Kalibrierung am unbewachsenen Boden vorgenommen werden. Mit der Annahme, dass der Boden auf dem ganzen Schlag ähnlich reflektiert (ähnliche Bodenfeuchte im Schlag) ergibt die Differenz beider Signale ebenfalls nur eine Abhängigkeit von der Bestandsdichte:

$$\Delta^{\text{Boden1}} = \text{Trans} + 2D$$

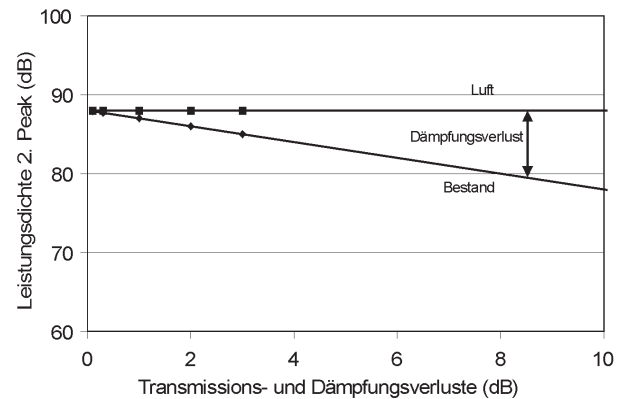


Abb. 23: Verlust durch Transmission und Dämpfung an der zweiten Reflexionsebene

In erster Näherung kann auch für Überschlagsrechnungen ohne Kalibrierung mit Blechspiegel $\text{Ref8} \sim \text{Trans3} \sim 0$ angenommen werden, da die Reflexion am ersten Übergang klein ist, d. h. die Transmission in % groß, woraus ein geringer Verlust Trans3 in dB resultiert. Ebenso ist die 2. Reflexion relativ stark, der Verlust Ref8 also gering:

$$P11 = P1 - P2 - D7 - D9 - P10$$

Mit der weiteren Annahme, dass die Dämpfungsverluste im Bestand wesentlich größer sind als die Spreizungsverluste ergibt sich näherungsweise:

$$P11 = P1 - 2 \cdot D$$

Man erkennt, dass sich die Dämpfung D als Funktion der Bestandsdichte so aus den Messungen abschätzen lässt.

Messungen am 2. Peak können also näherungsweise wie eine Transmissionsmessung mit doppelter Durchstrahlung der zu messenden Schicht gedeutet werden, was sonst nur mit getrennten Sende-/Empfangsantennen möglich ist.

Weitere Aussagen liefert die Differenz aus erstem und zweitem Peak bei Nadirbetrachtungen:

$$P6^1 - P11 = \Delta^1 = \text{Trans} + 2D_{\text{Dämpf}} + \text{Ref8} - (\text{Ref3} + \text{Streu})$$

wobei $(\text{Ref3} + \text{Streu})$ aus der ersten Reflexion bekannt sind und wegen $R_3 R_{\text{Streu}} + T = 1$ der unbekannte Wert Trans berechenbar ist. Ref8 spielt von der Größenordnung her bei feuchtem Boden nur eine untergeordnete Rolle.

Bei Messungen in Parallelposition ergibt die Differenz ein um die Reflexion vermindertes Maß für die Dämpfung als Funktion der Bestandsdichte:

$$P6^1 - P11^2 = \Delta^1 = \text{Trans} + 2D_{\text{Dämpf}} - (\text{Ref3} + S4)$$

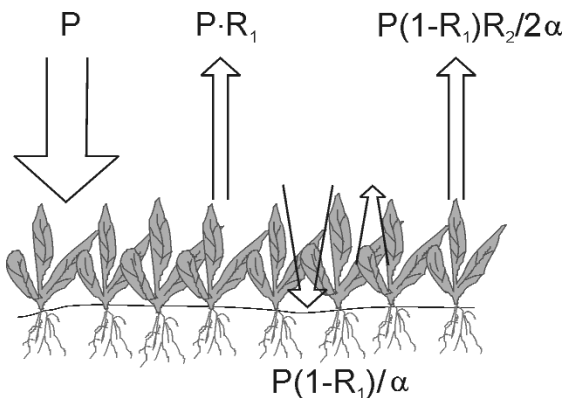


Abb. 24: Doppelreflexion mit Dämpfung im Bestand

Bezieht man auf eine Messung mit Blechspiegel an der ersten Reflexionsebene, ergibt sich ein direktes Maß für die Bestandsdichte:

$$P_{6\text{Blech}} - P_{112} = \Delta^{\text{Blech}2} = \text{Trans} + 2D$$

4.2 Wechselwirkungen von Reflexion, Transmission und Dämpfung

Entscheidend für die weitere Betrachtung ist nun, ob das Signal aus der ersten Reflexionsebene sauber vom Signal aus der zweiten Reflexionsebene zu trennen ist (Spagnolini, 1997). Betrachtet man z. B. aus Nadirposition einen Pflanzenbestand, so erhält man ein Echo, das sich im Allgemeinen als Doppelmessung zweier Reflexionswerte ergibt (in Abb. 24 mit physikalischen Werten dargestellt).

Am ersten Peak ist unmittelbar die Reflexion des Bestandes R_1 ablesbar. Der nicht reflektierte Anteil $(1-R_1) = T_1$ wird zunächst im Bestand gedämpft und dann am Erdboden mit R_2 rückgestreut. Die Höhe des zweiten Peaks ist zusammengesetzt aus $R_2(1-R_1)/2\alpha$.

Bei hohem Bestand (ausreichende Schichtdicke) sind beide Peaks getrennt ablesbar. Bei niedrigen Pflanzendecken überlagern sich die Messwerte. Die unbekannt Reflexionen R_1 und R_2 des Bestandes und des Bodens und $(1-R_1)/2\alpha$ als Maß für die Bestandsdichte können dann nicht getrennt abgelesen oder berechnet werden. Eine Betrachtung des notwendigen Abstands der Reflexionsebenen, d. h. die notwendige Schichtdicke des Pflanzenbestandes, erfolgt anhand Abb. 25.

Die Summenkurve 1 gibt noch am ehesten den Ausgangsbestand wieder: zwei Gaußkurven mit gleichen Varianzen = 0,2, jedoch unterschiedlichen Mittelwerten (bei 1,6 und 0,8) und unterschiedlichen Maximalwerten (0,6 und 0,4) werden addiert. Die Ausgangskurven lassen sich in der Summenkurve 1 noch gut erkennen, sowohl die Maximalwerte als auch deren Lage sind richtig wiedergegeben. Dasselbe gilt auch noch für die Maximalwerte der Kurve 2, obwohl hier der Mittelwert der zweiten Summandenkurve bei 1,4 liegt und schon näher an die festste-

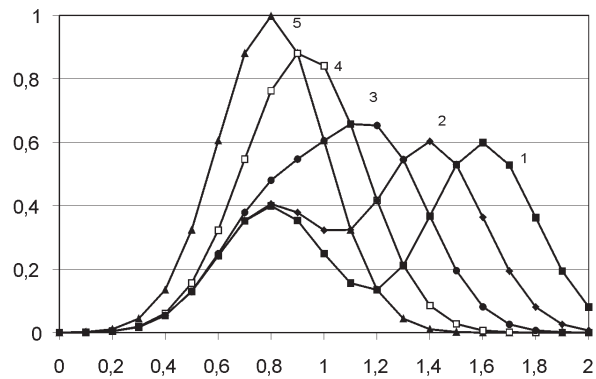


Abb. 25: Überlagerungen von Gaußkurven mit verschiedenen Mittelwerten

hende Kurve bei 0,8 herangerückt ist. Liegt der zweite Mittelwert jedoch bei 1,2 (Kurve 3); 1,0 (Kurve 4) oder 0,8 (Kurve 5), so lassen sich die Ausgangsverteilungen aus der Summenkurve nicht mehr ablesen. Auch verschieben sich sowohl die Lage als auch der Maximalwert der Summenkurve.

Zur sicheren Erkennung von 2 Peaks bedarf es demnach eines Mindestabstandes von dreimal der Varianz. Für Messungen aus Nadirposition ergibt sich daraus, dass obige Formeln nur angewendet werden können, wenn sich aufgrund der Bestandshöhe eine saubere Trennung der Echos erreichen lässt. Gelingt die Trennung nicht, muss mit nachfolgenden Näherungsansätzen gerechnet werden.

Ein hinsichtlich der Vegetationsdichte auswertbares Echosignal bei sehr **dichtem Bestand** und hohen Frequenzen ergibt sich, wenn der Boden nicht mehr durchscheint (siehe auch Kapitel 4.3.3).

Können in **dünnem Bestand** die Peaks nicht getrennt werden, d. h. ist die Wuchshöhe gering, helfen Vereinfachungen. Im allgemeinen ergibt sich die Energiedichte des rückgestreuten Signals aus der zweiten Reflexionsebene zu:

$$\text{Ref} = \text{Ref}2 + \text{Trans}1 - 2\alpha$$

Da bei dünner, flacher Vegetation der Transmissionsverlust sehr klein ist, kann man vereinfacht die Rückstreuung bei zusammengefasster Dämpfung $D = \alpha d$ auch darstellen als

$$\text{Ref} = \text{Ref}2 - 2D$$

Zusammen mit der ersten Reflexion an der Bestands-oberfläche und rücktransformiert aus dem dB – Bereich in den physikalischen Bereich ergibt sich als Summe der Einzelreflexionen aus Bestand und Boden:

$$R_{\text{ges}} = R_{\text{Veg}} + R_{\text{Boden}} / 2\alpha$$

wobei α der Verlustfaktor der Vegetationsdecke ist. Die

Dämpfung α nimmt nur geringe Werte an. Die Rückstreuung wird bei niedriger Bodenfeuchte also eher von der Vegetation (R_{veg}) bestimmt, bei hohen Bodenfeuchten zunehmend auch vom Boden (R_{Boden}). Diese Vereinfachung ist in der Literatur als semi-empirisches **“Wolkenmodell”** (water-cloud model) bekannt (Bindlish et al., 2001; Prevot et al., 1993). Die Radarrückstreuung eines Bestandes setzt sich danach zusammen aus der “Volumenrückstreuung” des Pflanzenbestandes und der Oberflächenrückstreuung des Bodens, abgeschwächt durch die Zwei-Wege-Dämpfung).

Statt mit der Dämpfung wird insbesondere bei höheren Frequenzen auch mit der **optischen Dichte** gearbeitet (Fung, 1979). Danach ist die Absorption der Pflanzen durch $\exp(-\delta)$ mit δ als optischer Tiefe gegeben. Üblicherweise ist in Pflanzenbeständen $\delta \leq 0,5$, wobei δ eine lineare Funktion des Wassergehaltes der Pflanzen in der Vegetation w (kg/m^2) ist:

$$\delta = k w$$

Die Rückstreuung des bewachsenen Bodens berechnet sich dann ganz ähnlich wie oben

$$P = P_{vegetation} + P_{Boden} \exp(-2 \delta)$$

mit δ als optische Dichte der Vegetation.

4.3 Reflexionsmessungen aus Nadirposition

4.3.1 Messungen in Gerste

Als Beispiel für einen Doppelpack ist in Abb. 26 ein dünner **Gerstenbestand** am 29. 5. aus Nadirposition bei 26,1 GHz vermessen. Die Reflexionswerte betragen 52 und 49 dB im Abstand von 85 und 148 cm. Das ergibt bezogen auf einen hier nicht dargestellten Blechspiegel mit einer Reflexion von ca. 100 dB Energiedifferenzen von $\Delta_1 = -48/2$ dB und $\Delta_2 = -51/2$ dB beziehungsweise $R_1 = 10^{-2,4} = 0,004$ oder $\epsilon_1 = 1,29$. Da R_1 sehr klein ist, gilt näherungsweise für die gedämpfte zweite Reflexion \log

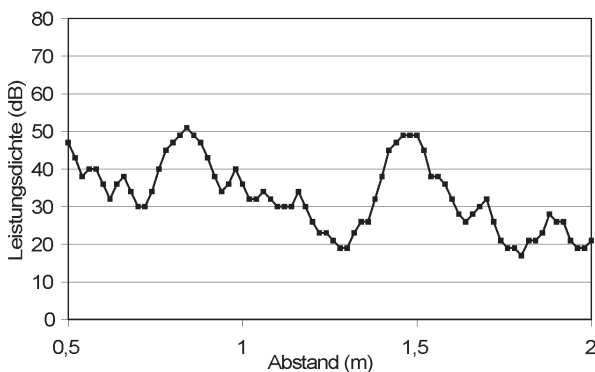


Abb. 26: Gemessener Doppelpack in Gerste

$(R_2 + D) = -2,55$. Das ergibt für sehr dünnen Bestand ein Maß für die Bodenfeuchte ($\epsilon_2 = 1,23$) oder für sehr trockenen Boden ein Maß für die Dämpfung durch den Bestand.

Als Ergebnis ist festzustellen, dass bei Nadirmessungen die Einflüsse aus Reflexion des Bodens und Dämpfung durch den Bestand hier nicht sauber getrennt werden können. Allerdings bleibt festzuhalten, dass der Abstand zwischen Erdboden und durchschnittlicher Pflanzenhöhe genau abgelesen werden kann: 148 cm – 85 cm = 63 cm. Für die Wuchshöhe der Gerste (Entwicklungsstand) ergibt sich so ein exaktes Maß.

Interessant ist der Vergleich dieser dünnen Gerste aus Abb. 26 mit einem dichteren Bestand auf dem selben Schlag in Abb. 27. Die Reflexion der dichten Gerste an der ersten Übergangszone im Bereich der Grannen ist nur geringfügig höher, allerdings ist der Bestand deutlich größer. Auch wird der zweite Reflexionspeak des Bodens in ca. 150 cm Entfernung in der dichten Gerste fast vollständig weggedämpft. Als Maß für die Entwicklung der Gerste bietet sich hier ebenfalls die Wuchshöhe an (ca. 70 cm Abstand vom ortsfest am Fahrzeug aufgehängten Radar-

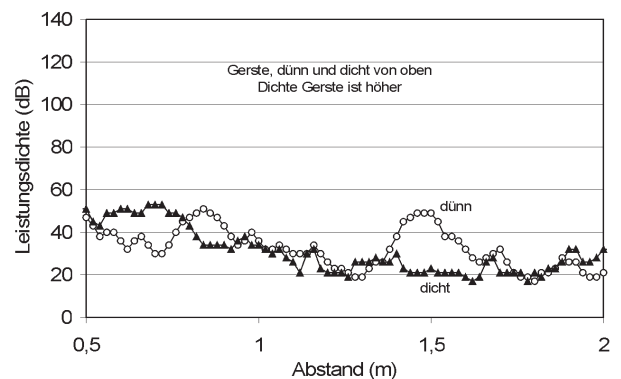


Abb. 27: Vergleich dünner und dichter Gerstenbestände aus Nadirposition (Ende Mai)



Abb. 28: Gerstensschlag Ende Mai

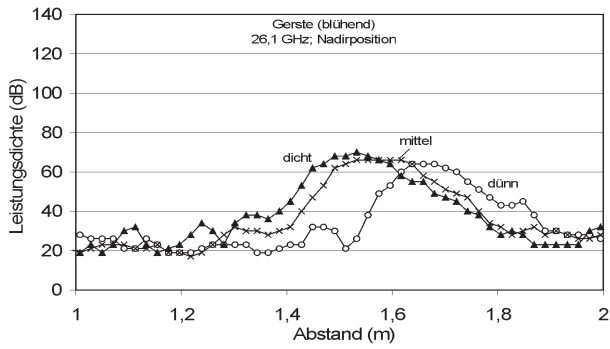


Abb. 29: Reflexionen verschiedener Bestandsdichten von Gerste

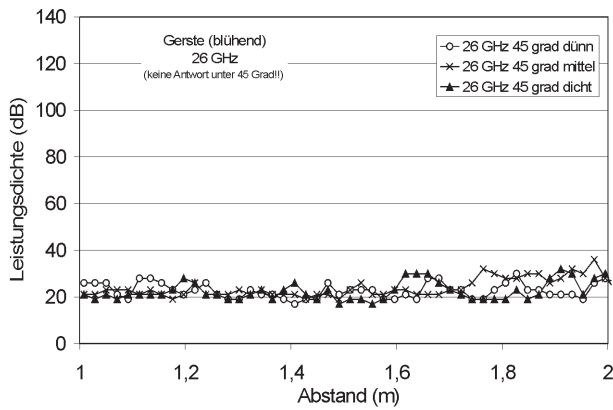


Abb. 30: Reflexion von Gerste bei einer Anstrahlung unter 45 Grad

gerät). Der dichte, ungestresste Bestand ist deutlich höher und lässt sich sicher vom zurückgebliebenen Bestand unterscheiden. Abb. 28 gibt einen optischen Eindruck vom dünnen Gerstenbestand.

Denselben Tatbestand einer nur geringen Unterscheidungsmöglichkeit in der Bestandsdichte von Gerste an der ersten Reflexionsfläche zeigt auch Abb. 29. Dünne, mittlere und dichte Gerste liegen zwar in richtiger Reihenfolge, unterscheiden sich aber nur geringfügig in der Reflexionsstärke. Möglicherweise hängt dieser geringe Unter-

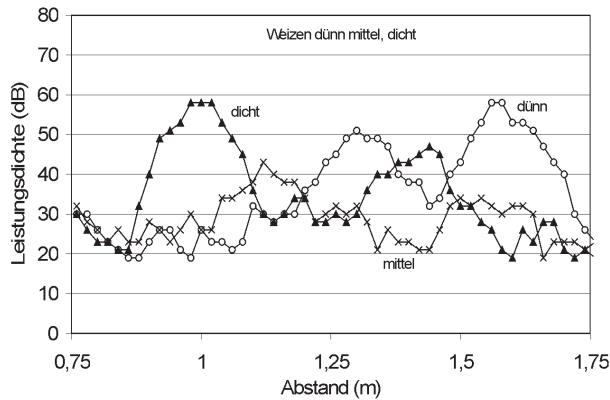


Abb. 31: Rückstreusignale aus einem Weizenbestand

schied mit der Grannenstruktur zusammen, die wie viele kleine Reflexionsebenen wirken. Auch ist dies möglicherweise der Grund, dass bei Anstrahlung unter 45 Grad zwischen dünnen, mittleren und dichten Beständen keinerlei Unterschied zu messen ist (Abb. 30). Hier liegt die Reflexion im Rauschpegel, das Signal wird vollständig absorbiert oder weggeleitet.

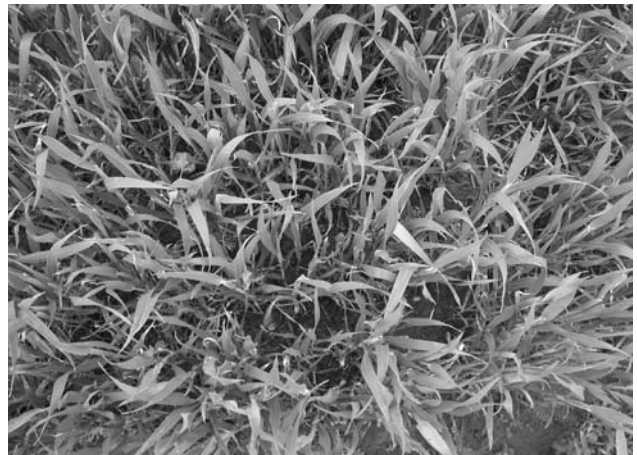


Abb. 32: Dünnere, mittlerer und dichter Weizenbestand

4.3.2 Messungen in Weizen

Aussagekräftiger erscheinen die Messwerte in Weizen. Die Rückstreusignale aus Nadirposition (Abb. 31) ergeben klare Abhängigkeiten von der Bestandsdichte (siehe Abb. 32 für die gewählten Bezeichnungen dünner, mittlerer und dichter Bestand). Während im dichten Bestand das schon hoch gewachsene ‚Blätterdach‘ aus Fahnenblättern die Reflexion bei ca. 1,00 m dominiert, sind im dünnen Bestand nicht nur die deutlich zurückgebliebene Wuchs-

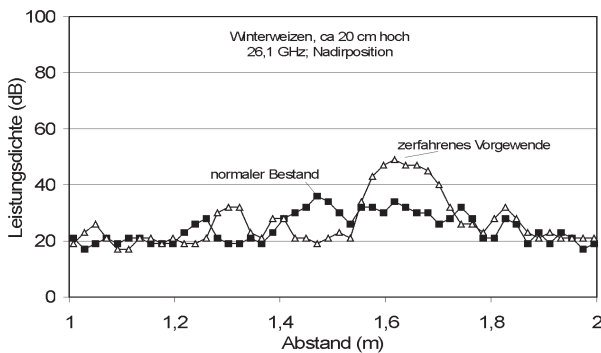


Abb. 33: Reflexion am Vorgewende

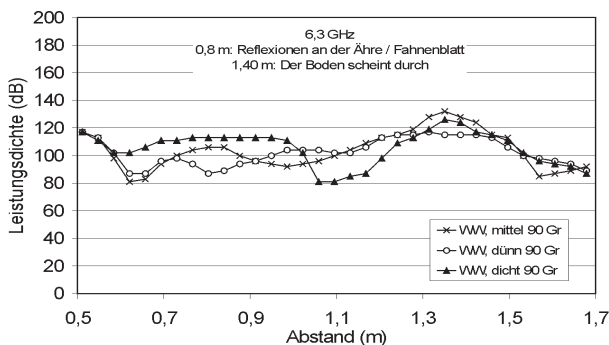


Abb. 34: Doppelreflexion von Boden und Bestand

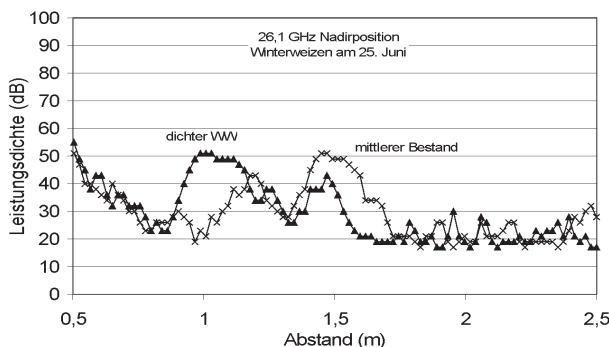


Abb. 35: Doppelreflexion von dichtem und mittlerem Winterweizen

höhe (erste Reflexion im Abstand von ca. 1,25 m), sondern zunehmend auch die Anteile der Reflexion vom Boden abgebildet (bei ca. 1,55 m). Eine sichere Unterscheidung zwischen dünnem, mittlerem und dichtem Bestand ist möglich.

Interessant ist auch die klare Abbildung eines zerfahrenen Vorgewendes im Vergleich zum normalen Bestand bei noch niedrigem Weizen Anfang Mai. Im Vorgewende dominiert die Reflexion des Bodens mit der flach liegenden oder teilweise zurückgebliebenen Pflanzendecke im Abstand von ca. 1,60 m. Der normale Bestand reflektiert bei ca. 1,45 m, der Weizen ist also ca. 15 cm hoch (Abb. 33).

Abb. 34 und 35 unterscheidet die Reflexion in Winterweizen Ende Juni bei unterschiedlichen Frequenzen in deutlich höheren Beständen. Bei niedriger Frequenz sind die Unterschiede durch die Bestandsdichte noch nicht so stark ausgeprägt. Bei hoher Frequenz erkennt man klar die Unterschiede in der Bestandsdichte sowohl am ersten Peak als auch invers an der Bodenreflexion bei ca. 150 cm. Auch die unterschiedliche Wuchshöhe zwischen gesundem, dichtem Weizen und zurückgebliebenen Weizen tritt deutlicher zu Tage.

4.3.3 Messungen an weiteren Feldfrüchten

In Abb. 36 sind die Rückstreusignale verschiedener Feldfrüchte dargestellt. Die Zuckerrüben waren schon groß, das Blattwerk gut entwickelt, die Reihen waren geschlossen. Auch Gras und Luzerne waren gut entwickelt. Die Intensität der Reflexion von Luzerne oder Gras war jedoch vermutlich wegen der fehlenden glatten Oberfläche deutlich geringer. Es besteht kein Zweifel, dass relative Abweichungen in der Bestandsdichte innerhalb eines Schlages sich auch entsprechend auf das Maximum der Reflexion abbilden.

In Abb. 37 ist die Reflexion von Zuckerrüben zweier Entwicklungsstufen Ende Mai dargestellt. Bei dünnem Bestand reflektiert der Boden sehr stark; die Reflexions-

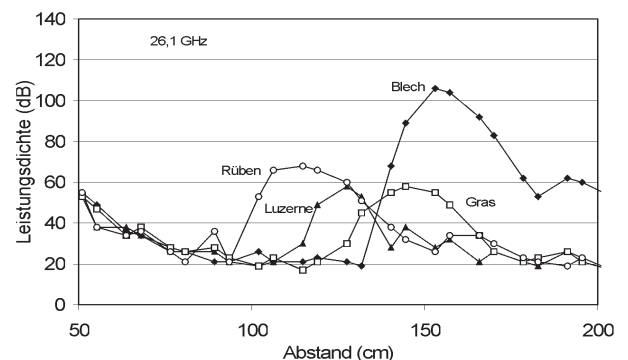


Abb. 36: Rückstreusignale verschiedener Feldfrüchte

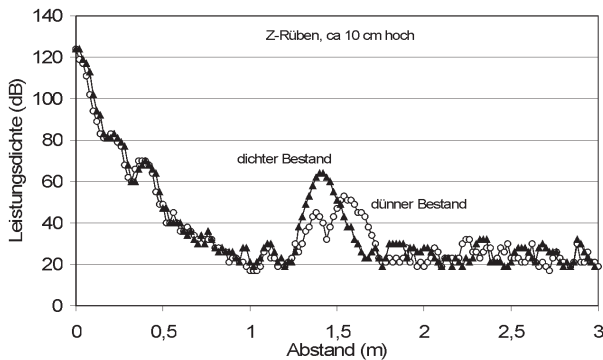


Abb. 37: Reflexionssignale aus einem Zuckerrübenbestand Ende Mai

stärke des gut entwickelten Bestandes ist deutlich höher, die Wuchshöhe lässt sich gut ablesen.

Die Auswertung der Reflexionen von Gras aus Abb. 38 geschieht nachfolgend. Die Abbildung gibt zugleich auch ein Gefühl für die (windinduzierten?) zu erwartenden Streuungen, da die Messungen ortsfest ausgeführt wurden. Wegen des sehr dichten Bestandes und wegen der hohen Frequenzen scheint der Boden nicht mehr durch, die Reflexion geschieht nur am Bestand. In diesem Fall (das Gras war kurz vor dem 1. Schnitt) ergab die Messung der direkten Reflexion aus Nadirposition

$$\Delta (\text{Gras} - \text{Blech}) = -40/2 \text{ dB} = -20 \text{ dB}.$$

Daraus errechnet sich

$$10 \log R = -20; \quad \log R = -2$$

$$R = 0,01; \quad \sqrt{R} = 0,1$$

$$\epsilon = \left(\frac{1,1}{0,9} \right)^2 = (1,222)^2 = 1,49$$

Die gemessene scheinbare „mittlere“ Dielektrizitätszahl einer Vegetationsdecke ist also wie erwartet relativ gering,

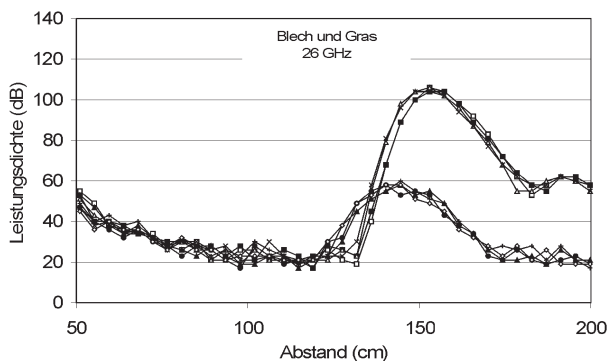


Abb. 38: Rückstreusignale eines Grasbestandes kurz vor dem ersten Schnitt im Vergleich zur idealen Reflexion

gleichwohl für einen Bestand relativ groß und so dem hohen Blattflächenindex angepasst. Der Boden trägt bei hohen Frequenzen nur unwesentlich zur Reflexion bei. In dichten Beständen und bei hohen Frequenzen ist die reflektierte Leistung eine direkte Abbildung der Bestandsdichten.

Weitere Beispiele zur Messung aus Nadirposition findet man in (Noyman et al., 1996; Rouveure, 2001).

4.4 Messungen aus horizontaler Parallelposition

Bestandsdichten kann man durch Messungen der Leistungsdichte von Mikrowellen erfassen, bei denen je nach Versuchsaufbau eher die Reflexionseigenschaften oder eher die Transmissionseigenschaften im Vordergrund stehen. Messungen aus senkrechter Nadirposition sind immer möglich, die Antwort ist oftmals ein Mix aus Bestands- und Bodeneigenschaften. Messungen aus horizontaler Parallelposition sind nur bei ausreichender Höhe des Pflanzenbestandes möglich, lassen sich jedoch leicht auf reine Transmissionsmessungen zurückführen, weil hier mit definierter rückwärtiger Reflexion gearbeitet werden kann. Wie oben abgeleitet beeinflussen dann nur noch die Bestandseigenschaften die Signalstärke. Da bei den preiswerten Abstandsradaren (anders als bei den speziellen Bodenradaren) keine unabhängigen Empfangsantennen zur Verfügung stehen (bauartbedingt dient die Sendantenne zugleich auch als Empfangsantenne) wird bei horizontalen Messungen mit Hilfe eines möglichst idealen, auf alle Fälle aber bekannten Reflektors die zu vermessende Schicht zweimal durchlaufen. Die Abschwächung der idealen Reflexion an der hinteren Ebene ist dann, wie in Kapitel 4.1 gezeigt, nur noch eine Funktion der Dämpfung in der Zwischenschicht (=Bestandsdichte).

In Praxis wird deshalb parallel zum Erdboden der Bewuchs (z. B. eine Getreideschicht) durchstrahlt und an einem Metallspiegel reflektiert (siehe Abb. 20). Ohne Bestand würde der Radarpuls nur an der Stelle des zweiten Peaks mit $R=1$ zurückgeworfen und hätte nur die geringen Spreizungsverluste. Mit Bewuchs sind je nach Dichte zwei Reflexionspeaks (vordere Pflanzenkante und rückwärtiger Metallspiegel) zu erwarten. Bei dichterem Bewuchs steigt die erste Reflexion, invers dazu wird die zweite Reflexion stärker gedämpft. Da Reflexion und Dämpfung nicht nur von den Dichten abhängen, sondern auch von den Frequenzen und der zu durchstrahlenden Schichtdicke des Bestandes, werden beide Einflussparameter deshalb nachfolgend untersucht.

4.4.1 Messungen an Kübelpflanzen

Für Testmessungen zur Untersuchung des Einflusses der Schichtdicke wurden entsprechende Kübel im Ausmaß $45 \times 90 \text{ cm}^2$ bepflanzt (Abb. 39) und einzeln oder im Doppelpack vermessen. In Abb. 40 und 41 sind die Ant-

worten für unterschiedliche Bestandsdichten und unterschiedliche Schichtdicken (1 oder 2 Kübel gleich 45 oder 90 cm) dargestellt. Der Weizen war in unterschiedlicher Saatstärke ausgesät. Die Bezeichnungen dünn, mittel und dicht beziehen sich auf die Saatstärken und die Reihenzahl.



Abb. 39: Bepflanzte Maurerkübel für Testmessungen

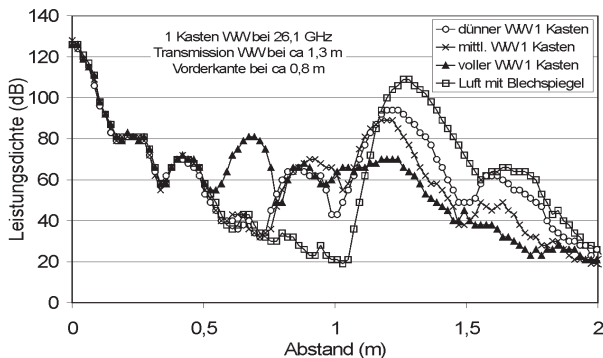


Abb. 40: Transmissionen bei unterschiedlichen Bestandsdichten (Schichtdicke: ein Kübel)

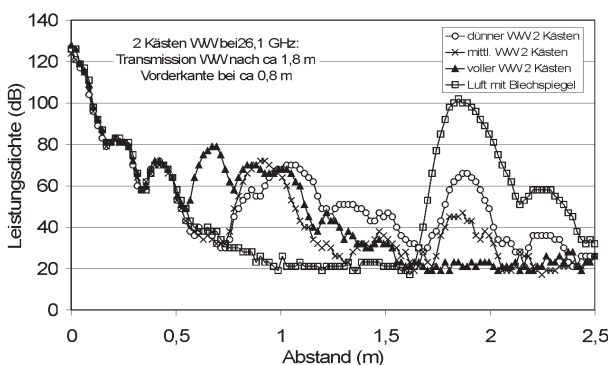


Abb. 41: Transmission bei unterschiedlichen Bestandsdichten (Schichtdicke: zwei Kübel)

Bei Betrachtung nur eines Kastens sieht man in der zweiten Reflexionsebene deutlich die durch die Dämpfung invers gemessenen Abhängigkeiten zwischen Luft (kein Bestand), dünnem, mittlerem und dichtem Bestand. Im Prinzip erkennt man diese Unterschiede auch schon an der Reflexionsstärke des Pflanzenbestandes, durch die die Höhe des vorderen Peaks bestimmt wird. Die Maxima der ersten Reflexion sind insbesondere beim dichten Bestand in unterschiedlichen, teilweise sehr geringem Abstand gemessen, unterschiedliche Spreizungsverluste sind aber vernachlässigbar. Der dichte Bestand reflektiert klar am stärksten, es folgt der mittlere und der dünne Bestand, Luft bleibt ohne Reflexion. Der Unterschied zwischen mittlerem und dünnem Bestand ist sowohl bei der vorderen als auch bei der hinteren Reflexion gering, jedoch an der zweiten, hinteren Ebene besser aufgelöst wie an der ersten, vorne gelegenen.

Bei zwei Maurerkübeln, d. h. größerer Schichtdicke, ist der durch die Dämpfung bestimmte zweite Peak noch klarer aufgelöst. Bei dichtem Weizen wird jedoch das Signal am Spiegel schon völlig weggedämpft; die zu vermessende Schicht ist also zumindest für den dichten Weizen zu dick. Auch am ersten Peak ist hier die erwartete Darstellung zu finden, die sich nur geringfügig vom Reflexionsverhalten für einen Kübel unterscheidet.

4.4.2 Messungen im Bestand

Die Abbildungen 42 und 43 zeigen das Reflexionsverhalten eines Weizenbestandes auf dem Feld bei 6,3 bzw. 26,1 GHz. Hier wurden jeweils 4, 3, 2 oder nur 1 Drillreihe durchstrahlt. Das Ergebnis bei 6,3 GHz zeigt eine gute Reflexion bei drei, vier oder beliebig vielen Reihen an der Vorderfront, jedoch deren mangelhafte Abbildung an der rückwärtigen Reflexionsebene (zu starke Dämpfung).

Ähnliches gilt für 26,1 GHz. Bei einer Reihe verlaufen die beiden Peaks (Drillreihe und Reflexionsblech) ineinander und sind nicht zu unterscheiden. Bei zwei oder drei Reihen gibt es eine klare Unterscheidung, ab 4 Reihen ist die rückwärtige Reflexion zu stark gedämpft. Es ergibt

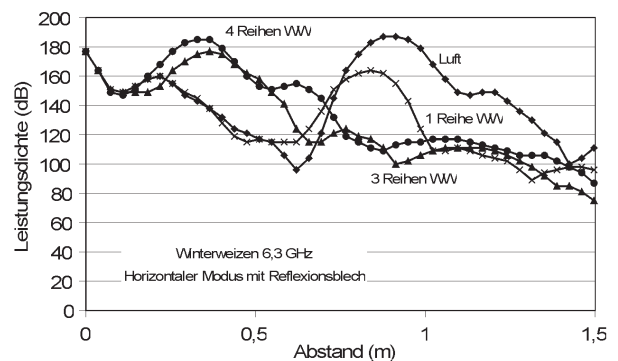


Abb. 42: Transmission eines Weizenbestandes quer zu den Drillreihen (6,3 GHz)

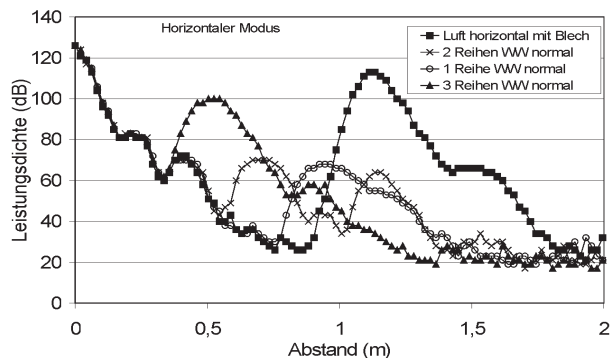


Abb. 43: Transmission eines Weizenbestandes quer zu den Drillreihen (26,1 GHz)

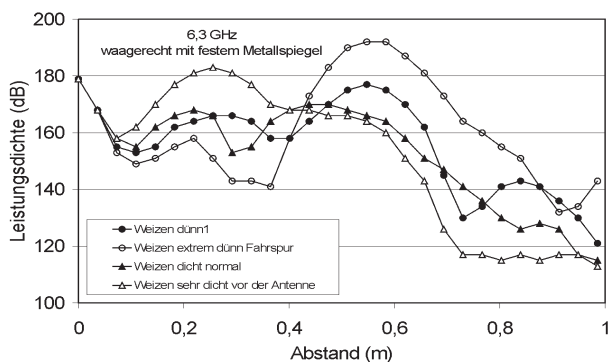


Abb. 44: Transmission im Bestand mit festem Spiegel

sich die Frage, ob zur Bestimmung der Dichte einer Vegetationswand nicht die erste Reflexion an der Pflanzenreihe ausreichend ist und somit ohne rückwärtiges Reflektionsblech gearbeitet werden kann.

Nach den ‚Handversuchen‘ wurde abschließend in einem Weizenbestand auch mit einem kleinen, am Fahrzeug fest montierten Spiegel bei 6,3 GHz gemessen. Das Fahrzeug fuhr in einem durch Trockenheit gestressten Bestand. Die angezeigte Entfernung von ca. 20 cm für das erste Echo entspricht der Länge der als Rund – Hornstrahler ausgebildeten Antenne. In Abb. 44 sind die Ergebnisse der Transmission für die aus der optischen Beurteilung stammenden Klassierungen sehr dünn, dünn, normal und dicht dargestellt. Wegen der sehr geringen Abstände zwischen Antenne und Bestand (die Antenne setzte praktisch auf die Pflanzen auf) wurden vor Versuchsbeginn auch Nahbereichsfehler vermutet. In den tatsächlichen Ergebnissen treten diese vermuteten Fehler kaum auf. Es zeigt sich vielmehr eine klare Abbildung der nur 30 cm dicken Schicht des Weizenbestandes hinsichtlich der Bestandsdichte.

4.4.3 Messungen mit definierter Bestandsdichte

Zur exakten Abbildung der Bestandsdichte auf die Peakhöhen wurde in einem anderen Jahr der Versuch mit den bepflanzten Kübeln nach Abb. 39 wiederholt und mit künstlich hergestellten unterschiedlichen Dichten vermessen. Durch Herausschneiden jedes 2. Halmes (50 % der

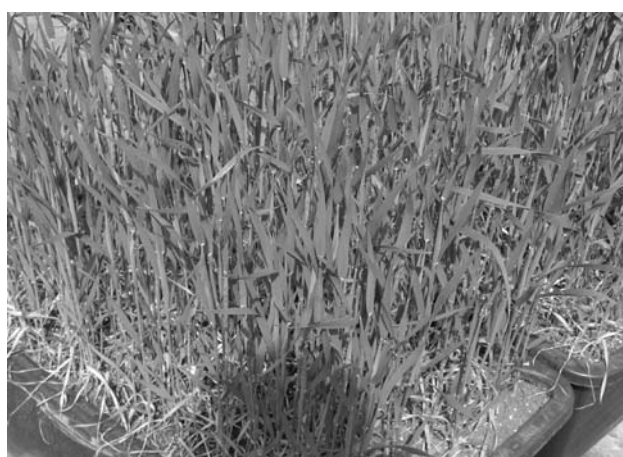


Abb. 45: Kübel mit 50 %, 75 % und 100 % Bestandsdichte

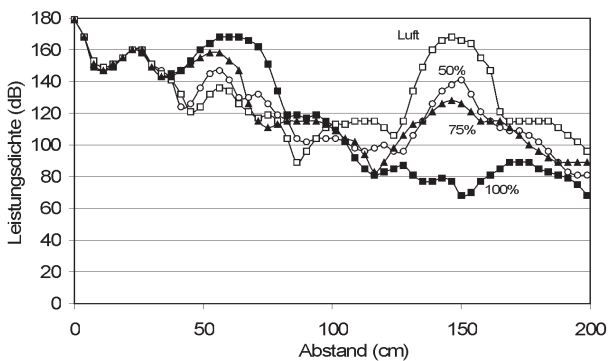


Abb. 46:
Transmissionmessung in Weizen mit definierter Ausdünnung

ursprünglichen Bestandsdichte) oder jedes 4. Halmes (75 % Dichte) einer Reihe ergaben sich zusammen mit der Originaldichte drei exakt definierte Variationen. Den optischen Eindruck zu dieser Versuchseinstellung liefert Abb. 45, wobei hier besonders auf die unterschiedlich durchscheinenden Böden und Wulstkanten der Kübel als Anzeichen der unterschiedlichen Bestandsdichte hingewiesen ist.

Als Ergebnis ergibt sich in Abb. 46 wieder die klare, teilweise sogar linear erscheinende Abbildung der Bestandsdichten sowohl für den ersten Peak an der Vorderfront nach ca. 60 cm als auch am Spiegel für den zweiten Peak bei ca. 150 cm. Für dichten Weizen (100 % Bestandsdichte) erscheint jedoch eine Schichtdicke von ca. 90 cm zur Auswertung des zweiten Peaks schon zu dick. Insgesamt ergeben sich jedoch gute Messmöglichkeiten für die Bestandsdichte. Dass in diesem Versuch mit größeren Schichtdicken wie z. B. in Abb. 44 gearbeitet werden konnte, liegt daran, dass hier ein größerer Reflexionsspiegel eingesetzt wurde.

5 Diskussion, Ausblick

5.1 Eignung für Bodenkennwerte

Grundsätzlich erscheint die Radarrückstreuung geeignet für die berührungslose Messung der Feuchte im Boden, denn die Reflexion einer Bodenoberfläche ist theoretisch nur eine Funktion der dielektrischen Materialeigenschaft ‚Permittivität‘. Bei den betrachteten Frequenzen ist die Permittivität im Wesentlichen eine Funktion des Wassergehaltes im Boden. Die gemessene Rückstreuung wird jedoch auch durch Störgrößen beeinflusst, die durch entsprechende Versuchseinstellung möglichst minimiert oder ausgeschaltet werden sollten. Störgrößen sind in erster Linie die Oberflächenrauigkeit und die Dichte des Bodens sowie ein eventueller Pflanzenbewuchs. Die weiteren Abhängigkeiten der Permittivität von z. B. der Temperatur sind geringfügig. Der Einfluss der Radarfrequenz ist konstant, bekannt und bei Kalibrierungsmessungen eingearbeitet.

Entscheidend für die Abbildung der Radarrückstreuung in Terme der für die Landwirtschaft so wichtigen volumetrischen Bodenfeuchte ist jedoch die Eindringtiefe der Radarwellen. Während in der praktischen Landwirtschaft die Bodenfeuchte der Wurzelzone interessiert, haben die hier verwendeten Radare eine sehr geringe Eindring- und Messtiefe von nur wenigen cm. Für größere Eindringtiefen benötigt man tiefere Radarfrequenzen als die hier verwendeten, wie sie z. B. bei den speziellen Bodenradargeräten eingesetzt werden. Mit diesen größeren und deutlich aufwändigeren Bodenradaren, die bei Frequenzen unter 1 GHz arbeiten, lassen sich insbesondere auch tiefer liegende Schichtungen erkennen. Es ist anzumerken, dass mit tieferen Arbeitsfrequenzen zugleich auch die Störeinflüsse von Pflanzenbewuchs, Rauigkeit und Dichte deutlich vermindert werden.

Obwohl eine Kalibrierung der Radarrückstreuung auch auf den in der praktischen Feldberechnung häufig verwendeten relativen Wert der Feldkapazität bezogen werden kann, ist eine Bewässerungssteuerung wegen der Oberflächeneffekte mit den derzeitigen Radaren nicht möglich. Die Oberflächeneffekte stehen zu sehr im Vordergrund, und die Entwicklungen für die Automobiltechnik hin zu immer höherfrequenten Radaren (derzeit 77 GHz) stehen in Opposition zu den Anforderungen für Bodenmessungen. Der immer stärker störende Rauigkeitseinfluss lässt sich zwar mit Messungen unter 45° herausrechnen, Wasserabhängigkeiten und Eindringtiefe werden mit höheren Frequenzen jedoch immer geringer.

Wenn demnach Bewässerungssteuerungen derzeit für die Anwendung von Radaren wohl kaum im Vordergrund stehen, so ergeben sich bei diesen demnächst äußerst preiswerten Sensoren dennoch überraschende Anwendungen für die Landtechnik aus Nebeneffekten. Neben exakten Messungen des Abstandes gehört dazu zum Beispiel die Beurteilung der Güte der Bodenbearbeitung. Moderne Radarsensoren messen nämlich neben Entfernung und Rückstrahlintensität über den Dopplereffekt auch die Relativgeschwindigkeit und lassen sich darüber hinaus sehr eng fokussieren oder in Abtastabschnitte unterteilen. Mit Reflexionsstärke (Oberflächenfeuchte), Abstand (Einsinktiefe des Reifens), Schlupf (Geschwindigkeitsunterschied Boden – Reifen) lassen sich zugleich die wichtigsten Einflussgrößen zur Beurteilung der Güte der Bodenbearbeitung messen. Die Gefahr von Bodenverdichtungen lässt sich so sicher anzeigen. Die Oberflächenfeuchte ist ferner bei Messungen in der Pflugsohle aussagekräftig. Gleichzeitig kann der Feuchtegehalt des Erdbalkens am Streichblech gemessen werden.

Auch die tatsächliche Dichte des Bodens ist messbar, wenn Sensoren mit unterschiedlichen Frequenzen (Wang et al., 1983) eingesetzt werden. Weil normalerweise nur der Wassergehalt interessiert, hat man für die Messung der Feuchte von Schüttgütern versucht, Funktionen abzuleiten, die weitgehend von der Dichte unabhängig sind

(Zhang et al.). Bekannt ist die Funktion aus Real- und Imaginärteil

$$f(\cdot) = \frac{\sqrt{\varepsilon'} - 1}{\sqrt{\varepsilon''}}$$

sowie die Funktion bei zwei Frequenzen

$$f(\cdot) = \frac{\sqrt{\varepsilon_1'} - 1}{\sqrt{\varepsilon_2'} - 1}$$

Aus diesen von der Dichte unabhängigen Funktionen kann man bei Kenntnis der Permittivitäten bei zwei unterschiedlichen Frequenzen z. B. aus der letzten Funktion umgekehrt auch die Verdichtung ableiten. Dagegen gelingt die Bestimmung des Imaginärteils ε'' nur durch Messung der Phasenverschiebung. Das ist derzeit nicht möglich. Allerdings würde mit ε'' der Ionengehalt im pflanzenverfügbaren Wasser messbar. Gleichzeitig wären Kennwerte für eine Düngerstrategie, die Berechnungsmenge und die Dichte des Bodens mit einem Sensor berührungslos erfassbar.

5.2 Eignung für Pflanzenkennwerte

Die Bestandsdichte kann sowohl in senkrechter als auch in horizontaler Messanordnung erfasst werden. Sie ist eine wichtige Bezugsgröße zur exakten Führung des Bestandes mittels präziser Einträge. Anders als durch Bodenkarten oder Ernteprofile bezieht sich die zur Steuerung benutzte Größe auf den aktuellen Zustand der Pflanzen am gerade überfahrenen Ort. Die Messgröße ‚Bestandsdichte‘ ist neu und ähnelt bei Kulturen im Entwicklungszustand dem Bedeckungsgrad oder Blattflächenindex (leaf area index LAI). Bisher konnte mit bildgebenden Verfahren nur ein Bedeckungsgrad kleiner 1 gemessen werden. Das Wachstum konnte also nur im Anfangsstadium verfolgt werden. Für größere und dichtere Bestände mit $LAI > 1$ gab es bisher keine berührungslose Erfassungsmöglichkeit.

Die Bestandsdichte (Menge der grünen Blätter im Volumen oder bei hohen Frequenzen eine Art Durchsichtigkeit) lässt sich grundsätzlich sowohl durch Transmissionsmessungen als auch durch Reflexionsmessungen erfassen. Die Mehrzahl der Messungen lässt sich dabei sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Position durchführen. Es ergeben sich jedoch unterschiedliche Eignungen.

Bei Transmissionsmessungen in horizontaler Parallelposition spielt praktisch nur die Dämpfung des Signals eine Rolle, also die Dichte des Bestandes. Die Auflösung ist gut, die Messtechnik bedarf aber eines Metallspiegels in 50 bis 100 cm Entfernung sowie eines ausreichend hohen Bestandes. Sind beide Voraussetzungen erfüllt, ergeben sich z. B. für Getreide sehr gute Ergebnisse.

Transmissionsmessungen aus senkrechter Nadirposition sind deshalb ungenauer, weil mit einer unbekanntem

Reflexion am Boden gemessen werden muss. Durch Kalibrierung am unbewachsenen Boden und mit der Annahme, dass auf dem zu messenden Schlag die Bodenverhältnisse annähernd gleich sind, gelingt eine eingeschränkte Bestimmung der Bestandsdichte.

Sinnvoller erscheinen in diesem Fall Reflexionsmessungen. Bei Messungen aus Nadirposition ist zwar auch hier zunächst der Anteil der vom Boden reflektierten Energie unbekannt. Bei dichtem Bestand reflektieren jedoch nur die Blätter, der Bodenanteil kann vernachlässigt werden. Bei seitlichen Messungen z. B. gegen eine Schnittkante oder eine Fahrspur taucht dieses Problem gar nicht erst auf. Und bei höheren Beständen lässt sich über den Abstand der Bodenanteil klar vom Bestandsanteil der Reflexion trennen. Reflexionsmessungen haben den großen Vorteil, dass sie keine zusätzlichen Versuchsaufbauten (Spiegel etc.) benötigen. Die Auflösung hinsichtlich der Bestandsdichte ist zwar etwas geringer als bei Transmissionsmessungen, bei Getreide jedoch völlig ausreichend.

Auf die immer wieder beobachtete Tatsache, dass gesunde, gut entwickelte Bestände in der Regel höher sind als gestresste, zurückgebliebene Pflanzen sei nochmals hingewiesen. Abstandsänderungen der Bestandsoberfläche (=Wachstumshöhe) geben also auch ein Bild vom Entwicklungszustand der Kultur. Die Bestandshöhe ist mit der vorgestellten Messtechnik einfach und problemlos zu erfassen. Das gleiche gilt für weitere, die Landtechnik interessierende Entfernungen im Nahbereich wie z. B. der Abstand zu einer Reihe, einer Schnittkante oder einer Fahrspur im Bestand. Auch das Auffinden von Wurzeln und Früchten in der Erde (Kartoffeln, Zwiebeln, Rüben etc.) wurde schon propagiert.

Nachfolgend wird noch gezeigt, dass sich das Problem des durchscheinenden Bodens auch elegant mit Laufzeitmessungen lösen lässt. Bei bekanntem Abstand wird je nach Dichte des Bestandes wegen der verlangsamten Laufzeit des Radarsignals die Reflexion der Bodenoberfläche scheinbar nach unten verschoben. Diese scheinbare Abstandsänderung ist gerade in noch dünnen Beständen gut messbar und gibt eine klare Aussage über die Bestandsdichte.

5.3 Alternative und Ergänzung: Laufzeitmessung

5.3.1 Scheinbare Bodenverschiebung durch Bewuchs

Die Dielektrizitätszahl einer zu vermessenden Schicht (z. B. Boden, Vegetation) kann auch aus der vergrößerten Laufzeit des Radarsignals im Medium abgeschätzt werden. Der Realteil der Permittivität beeinflusst die Geschwindigkeit des Radarsignals im Medium zu

$$v = c/\sqrt{\varepsilon'}$$

Die geringere Geschwindigkeit v im Medium führt zu einer scheinbaren Abstandsverschiebung einer hinter dem zu betrachtenden Medium liegenden Reflexionsfläche (Brumbi, 1995).

Angenommen, die Laufzeit in einem dielektrischen Medium mit der Schichtdicke d beträgt $t_1 = d / v$, während die gleiche Strecke in Luft in der Zeit $t_0 = d / c$ durchlaufen würde (Abb. 47). Das Verhältnis der scheinbaren

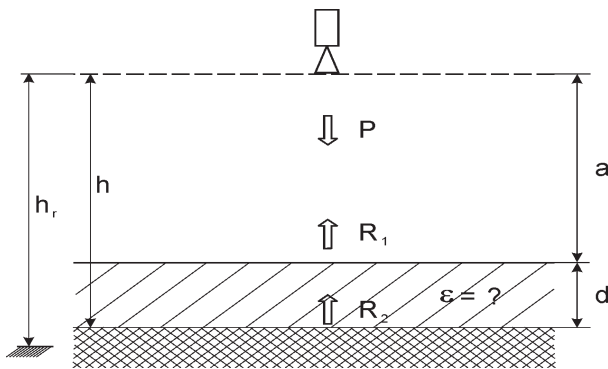


Abb. 47: Schema zur scheinbaren Bodenverschiebung

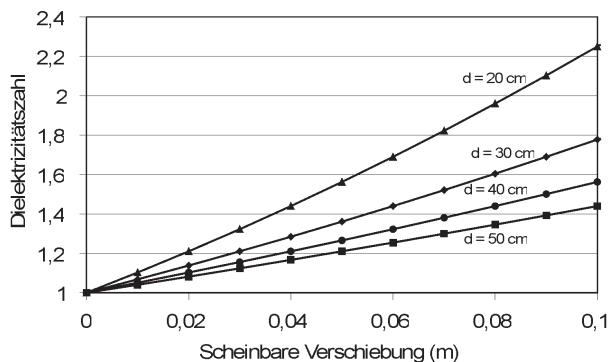


Abb. 48: Dielektrizitätszahl als Funktion der scheinbaren Verschiebung bei verschiedenen Schichtdicken

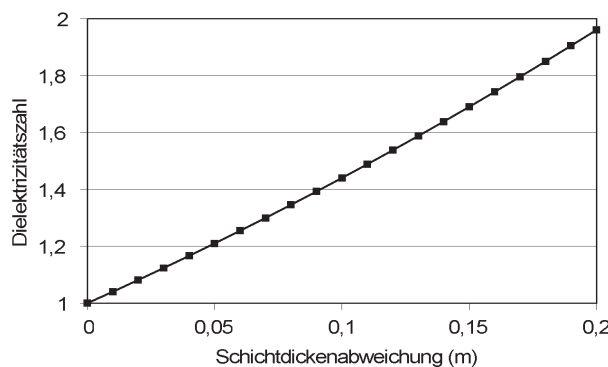


Abb. 49: Dielektrizitätszahl als Funktion der Schichtdickenabweichung bei einer Schichtdicke von 10 cm

Schichtdicke $d_r = h_r - a$ zur wirklichen Schichtdicke $d = h - a$ entspricht also dem Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten c / v oder

$$\epsilon = \left(\frac{h_r - a}{h - a} \right)^2$$

Die Messung der scheinbare Verschiebung funktioniert auch noch bei sehr kleinen, sonst nur schwer messbaren Reflexionen, d. h. bei kleinen Dielektrizitätszahlen, wie sie für Pflanzenbestände typisch sind.

Aus obiger Gleichung ergibt sich mit $(h-a) = d$

$$\epsilon = \left(\frac{d + \Delta d}{d} \right)^2$$

eine Gleichung für die Umrechnung der scheinbaren Verschiebung in die Permittivität (Bestandsdichte).

Umgekehrt gilt auch wegen $\sqrt{\epsilon} = 1 + \frac{\Delta d}{d}$ die Beziehung

$$\Delta d = d \cdot (\sqrt{\epsilon} - 1)$$

Als Beispiel ist eine flache, aber dichte Vegetationsdecke angenommen. Die Schichtdicke d ist geschätzt zu ca. 20 cm. In Nadirstellung ist der Abstand zum Boden tatsächlich $h = 1,50$ m. Der am Radarpeak gemessene Bodenabstand h_r ist jedoch 1,55 m. Damit ergibt sich

$$\epsilon = \left(\frac{h_r - a}{h - a} \right)^2 = \left(\frac{0,25}{0,2} \right)^2 = 1,56$$

als gemittelte Dielektrizitätskonstante für die Vegetationsschicht, die wiederum dem volumetrischen Blattanteil im Luftraum entspricht ("Vegetationsdichte"). Eine Überblick über die zu erwartenden Werte geben die Abbildungen 48 und 49.

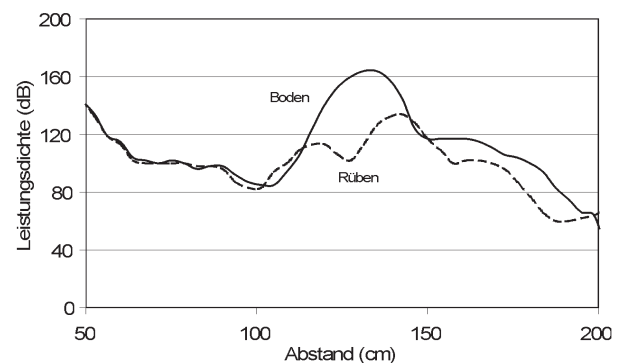


Abb. 50: Reflexionspeaks eines Zuckerrübenbestandes

5.3.2 Beispiele

1. Zuckerrüben: Im Vergleich zur Reflexion des unbewachsenen Bodens (164 dB bei 1,35 m) haben die Zuckerrüben am 10. 6. zwei Reflexionspeaks: 113 dB bei 1,18 m und 134 dB bei 1,42 m (Abb. 50). Der erste Peak

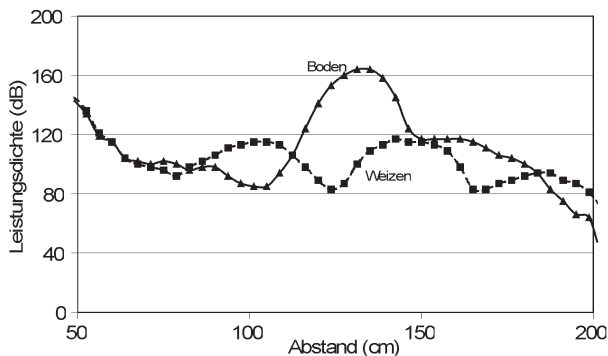


Abb. 51: Reflexionspeaks eines Winterweizenbestandes

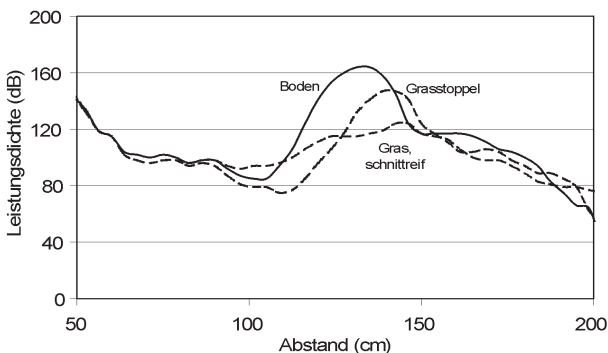


Abb. 52: Reflexion eines Grasbestandes

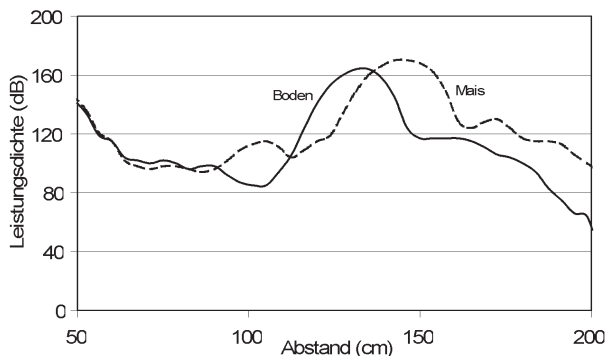


Abb. 53: Reflexion eines jungen Maisbestandes

rührt von den Blättern, der zweite Peak vom Boden. Zwischen Bewuchsoberkante und Boden beträgt der Abstand (= durchschnittliche Wuchshöhe oder pflanzliche Schichtdicke) 1,42 m – 1,18 m = 24 cm.

Neben der Schichtdicke interessiert aber auch die Auswertung der scheinbaren Verschiebung des Bodens: von 1,35 m ohne Bewuchs auf 1,42 m mit Zuckerrüben kurz vor Reihenschluss, also 7 cm. Mit

$$\epsilon = \left(\frac{d + \Delta d}{d} \right)^2 = \left(\frac{24 + 7}{24} \right)^2 = 1,29^2 = 1,67$$

ergibt sich ein Maß für die Blattmasse im Radarkegel.

2. Weizen: Entsprechendes gilt für Weizen, Abb. 51. Mit dem Abstand zwischen Weizenoberkante und dem Boden von 1,48 m – 1,15 m ergibt sich eine Schichtdicke von 33 cm. Die Verschiebung im Vergleich zum nackten Boden beträgt 1,48 m – 1,35 m = 13 cm. Das ergibt eine Dielektrizitätszahl von

$$\epsilon = \left(\frac{33 + 13}{33} \right)^2 = 1,39^2 = 1,94$$

für den gut stehenden Winterweizen.

3. Gras: Für schnittreifes Gras sind in Abb. 52 noch erkennbar: 1,24 m als erster Peak und 1,44 m als Abstand des verschobenen Bodens. Mit der Schichtdicke $d = 20$ cm und einer Verschiebung $\Delta d = 9$ cm ergibt sich

$$\epsilon = \left(\frac{29}{20} \right)^2 = 2,1$$

was dem dichten Bestand des Grasses entspricht.

Der Restbestand bei abgeernteter Grasstoppel war nicht auswertbar.

4. Gerste: Die in Abb. 26 vermessene relativ dünn stehende Gerste auf dem Vorgewende hat eine Schichtdicke von $d = 1,48 \text{ m} - 0,85 \text{ m} = 63 \text{ cm}$ und eine Abweichung von $1,48 \text{ m} - 1,35 \text{ m} = 13 \text{ cm}$. Der Wert für die Dielektrizitätskonstante ergibt sich zu $\epsilon = (76/63)^2 = 1,45$

5. Mais: Bei Mais ergibt die Messung ein deutliches Durchscheinen des Bodens (Abb. 53). Die Schichtdicke d ist $1,46 \text{ m} - 1,05 \text{ m} = 41 \text{ cm}$, die Verschiebung $1,46 \text{ m} - 1,35 \text{ m} = 11 \text{ cm}$. Damit wird die Dielektrizitätszahl als Maß für die Blattmasse im Radarkegel

$$\epsilon = \left(\frac{52}{41} \right)^2 = 1,6$$

Zusammenfassend erkennt man an obigen Beispielen für die verschiedenen Kulturen, dass neben der Wuchshöhe auch die Dielektrizitätszahl als wichtiges Maß für die Pflege einer Kultur (Dichte der Biomasse im Luftvolumen) erfasst werden kann. Die Werte für Gras, Weizen, Rüben, Mais und Gerste am 10. Juni sprechen mit 2,1;

1,94; 1,67, 1,6 und 1,45 eine klare Sprache. Der Sonderfall Mais (noch kleine, klar erkennbare Einzelpflanzen mit geringer Bedeckung des Bodens) passt auch gut in obige Reihe. Bei praktischen Messungen ist jedoch zu bedenken, dass online während der Überfahrt die Abstandswerte

verwackelt sind. Relativbewegungen des Auslegers bei Fahrbahnebenheiten verwaschen die Signale.

5.4 Eignung für den Maschineneinsatz

In den Abbildungen 54, 55 und 56 ist die Situation in Erntemaschinen nachgebildet. Ein soeben geerntetes Gras / Klee-Gemisch wurde auf ein Reflexionsblech gelegt und vermessen. Die klare Antwort sowohl bei 6,3 als auch bei 26,1 GHz zeigt die Maschinentauglichkeit der Messanordnung zur online Erfassung eines Erntestromes.

Die unterschiedlichen Paketdichten an Erntegut (2, 5 und 10 cm) bilden sich klar und deutlich ab. Je dicker die Ernteschicht, desto stärker die Dämpfung des rückgestreuten Signals. Das gilt grundsätzlich auch für eine ungleichmäßige Verteilung des Erntestromes, wie er im praktischen Einsatz zu erwarten wäre (Abb. 56). Auch wenn das Erntegut sehr ungleichmäßig vorbeiströmt, ist die Menge noch zu erfassen. Da bei den neuen und preiswerten Abstandsradares für die Automobilindustrie hier automatisch auch die Geschwindigkeit des Gutstromes mit gemessen wird, ergeben sich daraus interessante und preiswerte Möglichkeiten für das Monitoring verteilter Erntemengen eines Schlages.

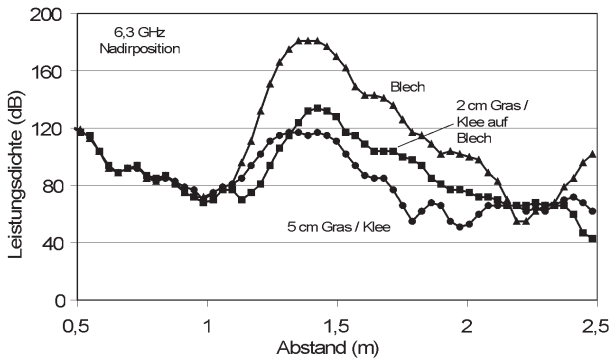


Abb. 54: Reflexionsverhalten unterschiedlicher Erntemengen (6,3 GHz)

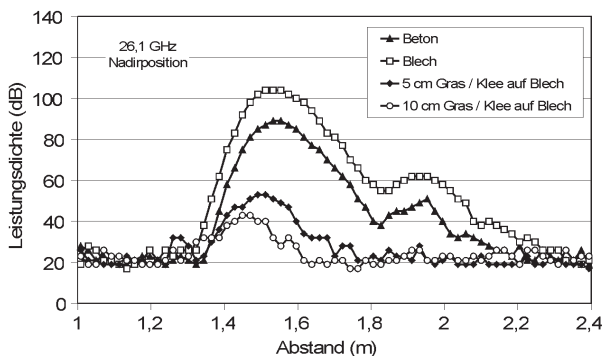


Abb. 55: Reflexionsverhalten unterschiedlicher Erntemengen (26,1 GHz)

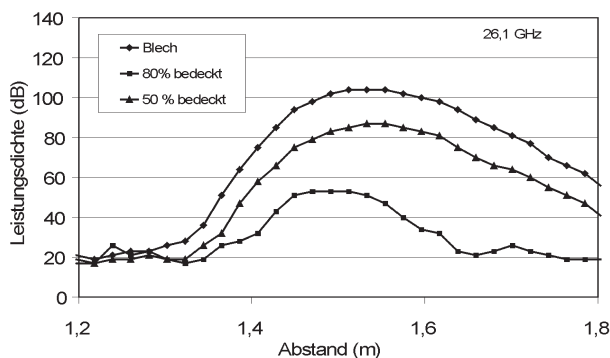


Abb. 56: Reflexionsverhalten bei ungleichmäßiger Bedeckung des Reflexionsbleches

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von Radarsensoren in der Prozesstechnik und demnächst verstärkt auch in der Automobiltechnik hat Entwicklungen angestoßen, die auch für die Landtechnik zu äußerst interessanten Einsatzmöglichkeiten führen. Im Sinne der Vorlauftforschung wurden deshalb an noch relativ teuren und vergleichsweise voluminösen Abstandssensoren zur Messung von Füllständen die Einsatzmöglichkeiten dieser neuen Klasse von Sensoren in der Landtechnik überprüft. Mittlerweile sind erste, für den rauen landtechnischen Einsatz geeignete Radarmodule im 100 €-Bereich auf dem Markt. Diese Module sind gekapselt, arbeiten mit Planarantennen und haben nur noch die Größe einer Zigarettenschachtel.

Das ursprüngliche Anwendungsgebiet der Radarsensoren war die Abstandsmessung im Nahbereich. Dazu werden bevorzugt technische Ausführungen in Form des Pulsradars oder des FMCW-Radars mit äußerst geringer Strahlungsstärke verwendet. Zusätzlich zur Laufzeit als Basis für den Abstand eines Objekts werden häufig auch die aufgrund des Dopplereffektes zu beobachtende Frequenzverschiebung für die Geschwindigkeit sowie die Energiedichte des reflektierten Signals als Maß für den Rückstreuquerschnitt des Zielobjektes erfasst. Neben Abstand und Geschwindigkeit kann also durch die Messung der Leistungsdichte des rückgestreuten Radarsignals auch die Permittivität des Zielobjektes charakterisiert werden. Diese Materialeigenschaft wird unter landwirtschaftlichen

Bedingungen weitgehend durch den Wassergehalt des Mediums bestimmt.

Relativ einfach und sehr genau gelingt die Bestimmung des Abstands zu einem Objekt. Der Abstand zur Erdoberfläche ist für ein exaktes Spritzbild damit ebenso leicht zu erfassen wie der Abstandes zu einer Schnittkante als Führungsgröße für Erntemaschinen. Da ein Teil der Radarenergie den Pflanzenbestand durchdringt und so z. B. der Erdboden bei senkrechter Anstrahlung durchscheint, ist auch die mittlere Wuchshöhe der Kultur kontinuierlich messbar. Damit lässt sich das Entwicklungsstadium des Bestandes und die relative Wüchsigkeit innerhalb eines Schlages messen. Die zusätzliche Erfassung der Geschwindigkeit als das älteste Anwendungsgebiet von Radarsensoren in der Landtechnik bringt weitere Vorteile. Ein Anstrahlen von Reifen und Boden ergibt als Geschwindigkeitsdifferenz den Schlupf, ein für die Qualität von landwirtschaftlichen Arbeiten wichtiges Kriterium.

Auf Messungen der Reflexionsstärke, die unter landwirtschaftlichen Bedingungen weitgehend vom Wassergehalt des reflektierenden Mediums abhängig ist, beruht die Erfassung von Bodenfeuchten. Insbesondere bei Kalibrierung auf die Feldkapazität eines vorgefundenen Bodens lässt sich die Bodenfeuchte in Prozent der Feldkapazität erfassen. Man hat damit allerdings nur ein Maß für den Wassergehalt der obersten Bodenschicht. Der Nachteil der derzeitigen Geräte mit ihrer vergleichsweise hohen Arbeitsfrequenz liegt in deren geringer Eindringtiefe. Die praktische Anwendbarkeit in der Berechnungstechnik ist so leider nicht gegeben. Bei deutlich niedrigeren Frequenzen könnte aber die durchschnittliche Feuchte des Wurzelraums statt nur der obersten Bodenschicht erfasst werden. Auch Wurzeln oder Knollen könnten dann im Boden detektiert werden (Butnor et al., 2001). Bodenrauigkeiten und Bewuchs würden die Bestimmung der Bodenfeuchte weniger stören.

Die mit den derzeitigen Geräten gewonnenen Echokurven können dagegen gut zur Erfassung der Bestandsdichte von Pflanzenbeständen herangezogen werden. Die Bestandsdichte von Winterweizen wurde bei einer Arbeitsfrequenz von 26,1 GHz gut erfasst. Die unterschiedliche Biomasse im angestrahlten Luftvolumen beeinflusst deutlich die Reflexion im Abstandsbereich zwischen Bestandsgrenze und Boden oder Reflexionsblech. Auch Messungen in Gerste, Rüben, Gras und Mais waren erfolgreich. Pflegearbeiten werden damit punktgenau realisierbar. Auch erntereife Bestände können trotz geringerer Feuchten noch in ihrer Dichte unterschieden werden. Messanordnungen zum Monitoring der aktuellen Erntemenge in Maschinen wurden ebenfalls erfolgreich getestet.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass mit Radarsignalen insbesondere neue Kennwerte zur Beurteilung von Kulturen gewonnen werden können. Die Bestandsdichte

oder die Wuchshöhe sind berührungslos erfassbar und können wesentliche Hinweise zur Führung der Bestände liefern. Die direkte Anpassung der Düngergabe oder des Spritzmitteleinsatzes je nach aktuellem Wachstumszustand wird ohne großen Aufwand während der Überfahrt ermöglicht.

Literatur

- Bindlish R, Barros AP (2001) Parameterization of vegetation backscatter in radar-based, soil moisture estimation. *Remote Sensing Environ* 76:130-137
- Butnor JR, Doolittle JA, Kress L, Cohen S, Johnsen KH (2001) Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiol* 21:1269-1278
- Fung AK (1979) Scattering from a vegetation layer. *IEEE Trans Geosci Electronics* GE17:1-6
- Noyman YIS (1996) Ground surface sensing through plant foliage using an FMCW radar. *Comput Electron Agric* 15:181-193
- Prevot L, Champion J, Guyot G (1993) Estimating surface soil moisture and Leaf Area Index of a wheat canopy using a dual-frequency (C and X Bands) scatterometer. *Remote Sensing Environ* 46:331-339
- Rouveure R (2001) Short range soil surface characterisation using microwaves techniques. Application to agricultural soil roughness measurement. Clermont-Ferrand, Univ, Diss, 2001
- Spagnolini U (1997) Permittivity measurements of multilayered media with monostatic pulse radar. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 35(2):454-463
- Wang RJ, O'Neill PE, Jackson TJ, Engman ET (1983) Multifrequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture and surface roughness. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* GGE-21:44-51
- Zhang Y, Okamura S (2000) New function of dielectric properties for density-independent moisture measurements. In: Kupfer K, Knöchel R, Kraszewski A (eds) *RF and microwave sensing of moist materials, food and other dielectrics : dielectric properties and sensor technology, sensor applications in frequency and time-domain range, market of RF and microwave sensors ; special volume*. Weinheim : Wiley-VCH, pp 111-116