- den Tag im Jahr, zur Bestimmung des Abstandes Sonne–Erde,
- die Sichtweite und den Aerosoltyp (städtisch, ländlich),
- die Flugrichtung und -höhe,
- eine Datei, die die Meßdaten eines Radiosondenaufstiegs enthält (steht diese, wie in diesem Fall, nicht zur Verfügung, so muß eine Datei erzeugt werden, die die Daten eines Standard-Atmosphären-Modells enthält; bei dieser Messung wurde die „midlatitude summer atmosphere“ gewählt [MCCLATCHEY 1972], siehe Anhang–SENSAT–5),
- den spektralen Bereich des Detektors,
- die Apparatefunktion des Detektors (aller Kanäle, siehe Abb. 10, Seite 19)

und einige andere zur Festlegung der spektralen Auflösung (Stützstellenabstand).

	1991	1992	1994
Datum Uhrzeit	21.08. 13.50h	25.04. 12.20h	18.10. 11.30h
Sonnen-Zenith-Winkel	41,7°	36°	59,5°
Sonnen-Azimut-Winkel	214,7°	182,7°	171,2°
Tag des Jahres	233	117	291
Sichtweite	25 km	25 km	30 km
Aerosoltyp	städtisch		
Flugrichtung	100° (Ost-Süd-Ost)		
Flughöhe	300m		

Tabelle 6: SENSAT-5 – Eingabedaten

SENSAT–5 erzeugt als Ausgabe eine Tabelle (vgl. Tabelle 7), die die Strahldichte am Detektor in Abhängigkeit der Reflektanz des Objektes für verschiedene Scanwinkel enthält (Datei-Endung „.atm“). Aus dieser läßt sich umgekehrt entnehmen, welchen Wert die Reflektanz eines Objektes haben muß, wenn der Scanner eine gemessene Strahldichte bei einem bekannten Scanwinkel liefert („Look-up-table“-Verfahren zur Invertierung von komplexen Modellen). Außerdem befindet sich in der Tabelle eine Spalte mit Q-Faktoren, die zur Berechnung des Überstrahlungseffektes herangezogen werden, sowie eine Spalte mit der totalen Transmission T, mit der die Strahlung den Weg von der Sonne zum Sensor passiert, die für die Berechnungen in dieser Arbeit aber nicht benötigt wird.

0,00E+00	0,91E-01	C0, C1, L (MILLI-W/CM*CM*SR*MICROMETER)				
ANGL	L (R= 0%)	L (R=10%)	L (R=30%)	L(R=60%)	Q(30%)	T(total)
-43,0	0,39914E-01	0,19764E+01	0,58731E+01	0,11778E+02	0,0216	0,9223
-40,3	0,36750E-01	0,19758E+01	0,58778E+01	0,11790E+02	0,0210	0,9245
-37,6	0,33985E-01	0,19754E+01	0,58819E+01	0,11801E+02	0,0205	0,9264
. . .						
37,6	0,34495E-01	0,19758E+01	0,58821E+01	0,11801E+02	0,0205	0,9264
40,3	0,36075E-01	0,19750E+01	0,58767E+01	0,11789E+02	0,0210	0,9245
43,0	0,37807E-01	0,19742E+01	0,58706E+01	0,11775E+02	0,0216	0,9223

Tabelle 7: Auszug aus einer ATM-Datei (Kanal 6, 1992)

Mit einem Programmdurchlauf, der ca. 30 Minuten (auf einer SUN Sparc 10) bei angemessen hoher Berechnungsauflösung (Δk = 50 cm^{-1}) dauert, kann immer nur ein Kanal des Daedalus simuliert werden. D.h. es dauert ca. 5 Stunden, bis für alle Kanäle die 10 ATM-Dateien zu einem bestimmten Parametersatz vorliegen.

4.2.4 Reflektanzbildberechnung – ref_image

Das von Thomas Hepp erstellte und in [HEPP 1994] vorgestellte C-Programm ref_image dient der Erzeugung von Reflektanzbildern aus den Eingaben

- Grauwertscannerbilder im TIFF-Format,
- Header-Daten im TIFF-Format,
- Kalibrierung des Daedalus-Scanners auf absolute Strahldichten und den
- ATM-Dateien (SENSAT–5) für alle Daedalus-Kanäle.

D.h., das Programm realisiert zum einen die Kalibration des Daedalus-Scanners zur Erzeugung von Strahldichtebildern (L_R, siehe Abb. 24) und andererseits das „Look-up-table"-Verfahren zur Berechnung der Reflektanzwerte (incl. linearer Interpolation).

Die Ausgabe des Programmes ist ebenfalls eine TIFF-Datei (mit 10 Bildeinträgen, eins pro Kanal), die die Reflektanzbilder beinhaltet (Dateinamenserweiterung „-cor"). Jedes Bildelement (Pixel) wird in der Datei mit 8 Bit pro Kanal repräsentiert, welche einen Zahlenbereich von 0...255 darstellen. Dabei entspricht der Wert 0 einer Reflektanz von 0 und der Wert 255 einer Reflektanz von 1.

4.2.5 Überstrahlungseffekt – adjacen

Im idealen Fall sollte nur Strahlung des zu beobachtenden Objektes auf den Sensor fallen. Durch die Streuung der Strahlung an den Luftmolekülen und Aerosolteilchen gelangt aber auch Strahlung aus der Umgebung in den Sensor. Dieser Effekt wird *Überstrahlungseffekt* (Adjacency Effect) genannt. Er tritt besonders stark bei dunklen Flächen auf, die von hellen Flächen umgeben sind.

Zur Kompensation des Überstrahlungseffektes wird von der Strahldichte jedes einzelnen Pixels ein gewichteter Mittelwert der Strahldichten der umgebenden Pixel abgezogen [HEPP 1994]. Das von Thomas Hepp erstellte Programm „adjacen“ dient der Korrektur der Bilddaten um eben diesen Effekt.

Die Ausgabe des Programmes ist wieder eine Tiff-Datei, die dann die endgültigen Reflektanzbilder enthält (Dateinamenserweiterung „-adj“).

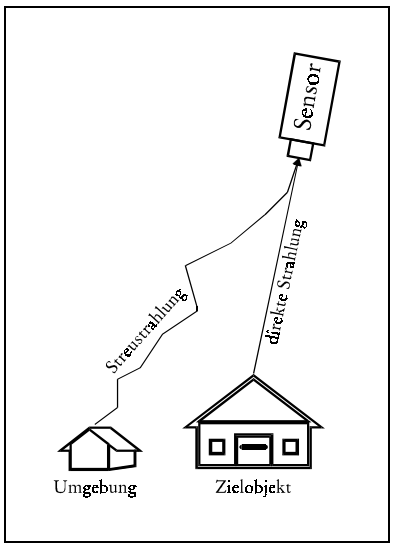

Abb. 26: Überstrahlungseffekt

4.2.6 Fehlerbetrachtung

Eine systematische Fehlerbetrachtung beim Prozeß der Reflektanzbildberechnung ist schwierig, da für viele Parameter und deren Fehler nur Schätzwerte existieren. Zur Berechnung der Strahldichten L_S und L_R (Abb. 24) sei hier angemerkt:

L_R: Die Kalibrierung mit der Daedalus–Testbench ermöglicht die Berechnung absoluter Strahldichten aus den Grauwerten des Scanners. Die Strahldichten sind dann mit einem maximalen Fehler von 10% behaftet [AMANN 1994].

L_S: Eine weitere Fehlerquelle verbirgt sich hinter den Eingabeparametern des Programmes SENSAT–5. Einige der Eingabeparameter können nur sehr ungenau bestimmt werden. So sind z.B. die Sichtweite und der Aerosoltyp (und damit der Aerosolgehalt) nur sehr vage bekannt, und der Radiosondenaufstieg wird gänzlich durch eine Standardatmosphäre ersetzt.

Zu weiteren Fehlern in den Werten der absoluten Reflektanzbildern, trägt natürlich bei, daß das Programm SENSAT–5 nur ein Modell, eine Simulation des Strahlungstransportes in der Atmosphäre darstellt. Der Fehler, der bei diesen Berechnungen entsteht ist im Rahmen dieser Arbeit nicht abschätzbar, da bei diesem komplexen Strahlungstransportmodell nur eine statistische Fehlerbestimmung in Frage kommt, bei der die Eingabeparameter variiert werden und die daraus resultierende Variationen der Ergebnisse eine Fehlergrenzabschätzung zuläßt. Die Anzahl der Eingabeparameter ist aber viel zu groß, und deren Grenzen unbekannt.

Zusätzlich zu der Kalibrierung auf absolute Strahldichten mit der Testbench der Firma Daedalus, wurde erstmalig von der DLR begonnen, den Daedalus-Scanner an einer Ulbrichtkugel (∅ ca. 2m) zu eichen. Eine Ulbrichtkugel ist eine von innen weiß gestrichene Hohlkugel, in der an verschiedenen Orten Lampen angebracht sind. Die aus einer möglichst kleinen Öffnung aus der Kugel heraustretende Strahlung ist dann nahezu homogen und dessen Intensität und Spektrum bekannt, wenn alle Daten der Lampen bekannt sind. Diese Messungen ergaben allerdings eine starke Winkelabhängigkeit, deren Ursache noch nicht geklärt werden konnte. Es ist anzunehmen, daß der Effekt eine Überlagerung einer Winkelabhängigkeit des Scanners

und einer Asymmetrie der Ulbrichtkugel ist. Somit wurde hier auf die Kalibrierung mit der Ulbrichtkugel verzichtet.

Abb. 27 zeigt für jeden Kanal das über 100 Messungen gemittelte Spektrum der Ulbrichtkugel. Die maximale Winkelabhängigkeit reicht von ca. 4% (Kanal 2-4) bis 20% (Kanal 0). Die „Treppenstufen“ in den Spektren entstehen durch die endliche Auflösung des Scanners (Grauwerte werden als ganze Zahlen erfaßt).

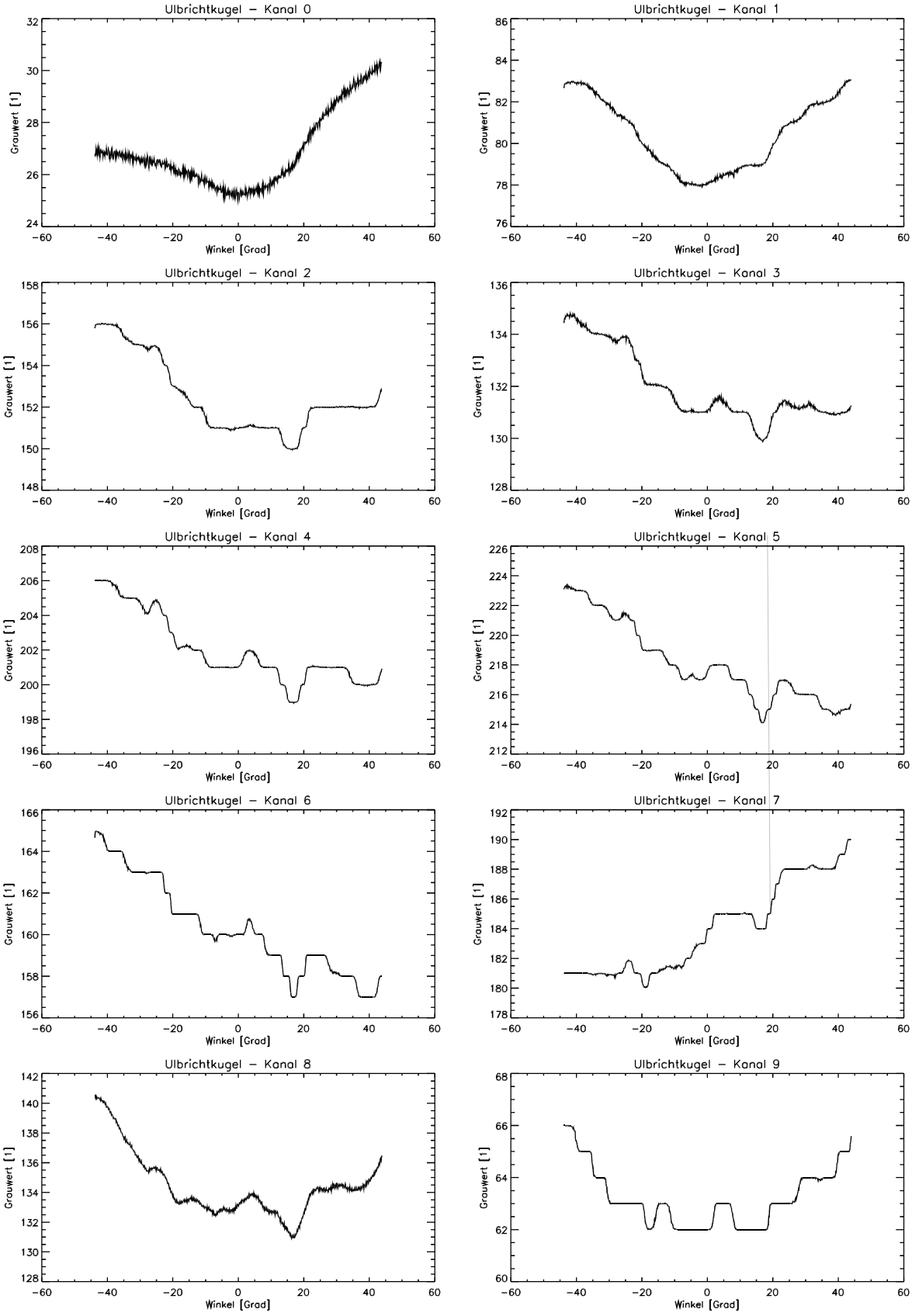

Abb. 27: Daedalus-Messungen an der 2m-Ulbrichtkugel (mit unterdrücktem Maßstab)

5 Vergleich IRIS – Daedalus

Wie in 4.2.6 erwähnt, sind die absoluten Reflektanzwerte der Daedalus-Messungen mit einem relativ großen Fehler behaftet, der zudem nur grob geschätzt werden kann. Um die Möglichkeit zu schaffen, diesen Fehler etwas präziser anzugeben, können die IRIS-Reflektanzen herangezogen werden, von denen der Fehler erstens genauer bekannt, und zweitens kleiner ist, als der der Daedalus-Reflektanzen.

Es liegt also nahe, eine Gegenüberstellung der absoluten Reflektanzen aus den IRIS- und den Daedalus-Messungen vorzunehmen.

5.1 Darstellung

Die Daten des IRIS-Spektroradiometers liegen als spektral und dynamisch hochaufgelöste Spektren von jeweils nur einer speziellen Oberfläche vor, wobei hingegen der Daedalus-Scanner ein bildgebendes System ist, das, im Gegensatz zum IRIS, eine geringe spektrale Auflösung besitzt. Um die Daten nun vergleichen zu können, bedarf es einer Aufbereitung der Daten.

5.1.1 Aufbereitung der IRIS-Spektren zum Vergleich

Von den sechs, zur Vergleichsmessung ausgewählten Testflächen wurden jeweils mehrere Spektren aufgenommen, z.T. örtlich um einige Zentimeter versetzt, um eine statistische Aussage über die Streuung der Fläche machen zu können. Es wurden daher zunächst alle Messungen von einer Testfläche zu einem Spektrum gemittelt, um den statistischen Fehler zu minimieren.

Da die IRIS-Spektren sehr viel höher aufgelöst sind als die des Daedalus-Scanners, ist es nötig, diese noch über die Spektralbereiche der einzelnen Daedalus-Kanäle zu mitteln (Abb. 28).

Dazu genügt es, das arithmetische Mittel zu berechnen, ohne die Apparatefunktionen der einzelnen Daedalus-Detektoren zu berücksichtigen, da diese ja bereits in die SENSAT-5-Berechnungen eingehen. Bei den Spektren handelt es sich um absolute Reflektanzspektren, die reine Objekteigenschaften darstellen und unabhängig von irgendeiner Apparatur sein sollten.

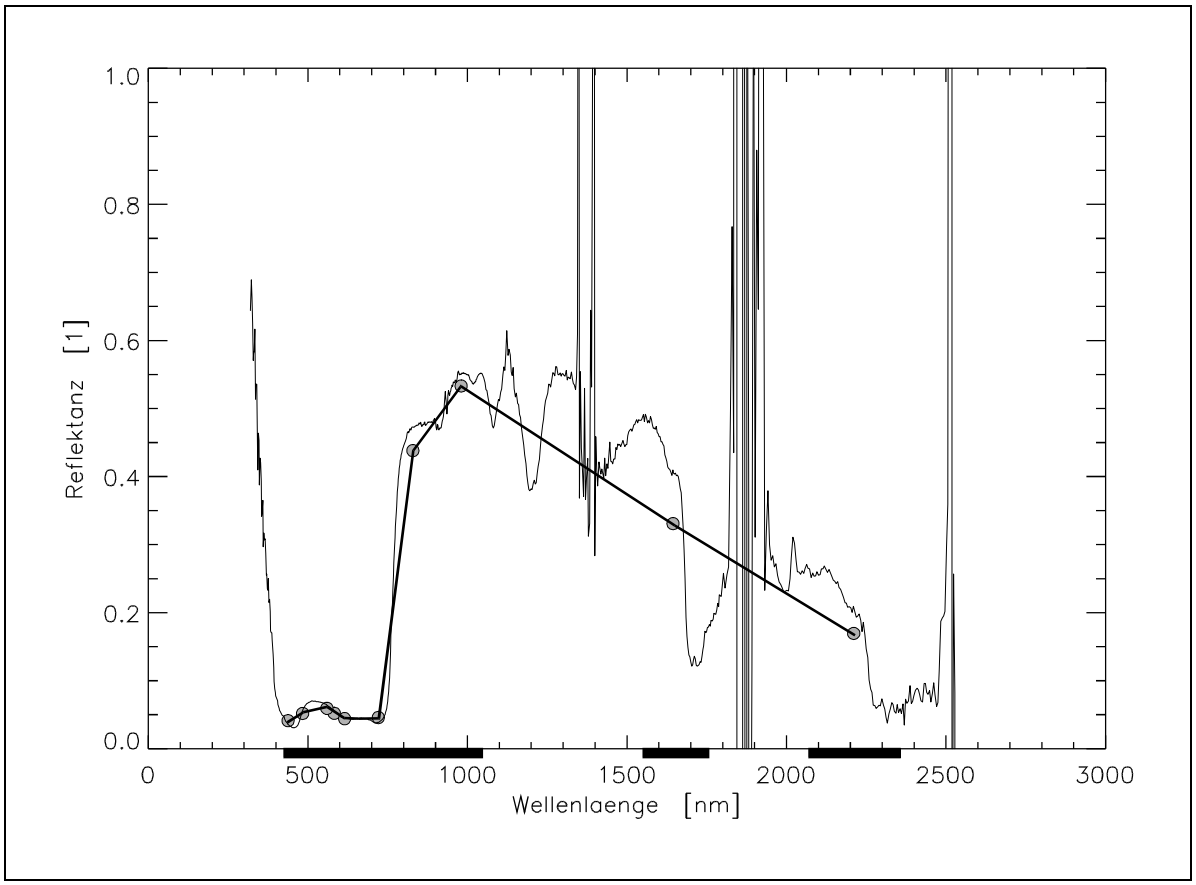

Abb. 28: IRIS-Messung (Kunstrasen) und Mittelung (graue Punkte) der IRIS-Daten über die Bereiche der Daedalus-Kanäle (schwarze Balken). Die fettgezeichnete Kurve verbindet diese Punkte zur besseren Anschauung.

Die IRIS-Reflektanzpektren weisen an einigen Stellen unphysikalische Unstetigkeiten und z.T. sogar negative Werte auf (Abb. 28). Die Erklärung hierfür liegt in der Division und Subtraktion kleiner Zahlen. Es läßt sich beobachten, daß diese Unstetigkeiten dort auftreten, wo sich starke Wasserdampf–Absorptionsbanden der Atmosphäre befinden, was bedeutet, daß das IRIS-Spektroradiometer sehr schwache Strahldichten sowohl von der Referenz- als auch von der Zielfläche aufnimmt. Von diesen, im Meßdatensatz als sehr kleine Zahlen repräsentierten, Meßwerten wird dann für die Berechnung der Reflektanzen der Dunkelstrom abgezogen und anschließend der Quotient gebildet. Da nun die Dunkelstrommessung und die Strahldichtemessungen mit Schwankungen versehen sind (Rauschen etc.), kann es vorkommen, daß der Quotient einen sehr großen oder sehr kleinen Wert annimmt (oder sogar undefiniert ist, wenn der Referenzwert an einer Stelle null ist).

Es ist natürlich kein Zufall, daß keiner der Daedalus-Kanäle eine Überlappung mit diesen Unstetigkeitsbereichen aufweist. Der Daedalus-Scanner hat ganz bewußt dort keine Kanäle, wo Absorption der atmosphärischen Gase auftritt und deshalb kein starkes Meßsignal zu erwarten ist.

Die Mittelwertbildung der IRIS-Spektren über die Daedalus-Kanäle erfolgte mit einem in IDL geschrieben Programm (`todaed.pro`).

5.1.2 Aufbereitung der Daedalus-Spektren zum Vergleich

Um die Spektren aus den Daedalus-Bildern mit den IRIS-Messungen zu vergleichen, mußten vorerst die IRIS-Meßorte auf den Bildern gefunden werden. Diese einfache Arbeit wurde auf rein visuelle Weise durchgeführt und brachte das Ergebnis in Abb. 5 und Abb. 6 (die Meßorte sind zu finden in den Flugstreifen NUER03, NUER07 und NUER13).

Nach Auffindung der Meßorte wurde daß Reflektanzspektrum dieses Ortes aus dem Mittelwert der Spektren von möglichst vielen, den jeweiligen Punkt umgebenden Bildelementen (Pixeln) bestimmt. Die Umgebung konnte mit Hilfe eines IDL-Programmes (`clippolyzoom.pro`) von Rafael Wiemker, Universität Hamburg, in Form eines Polygons direkt im Scannerbild gezeichnet werden (Abb. 29).

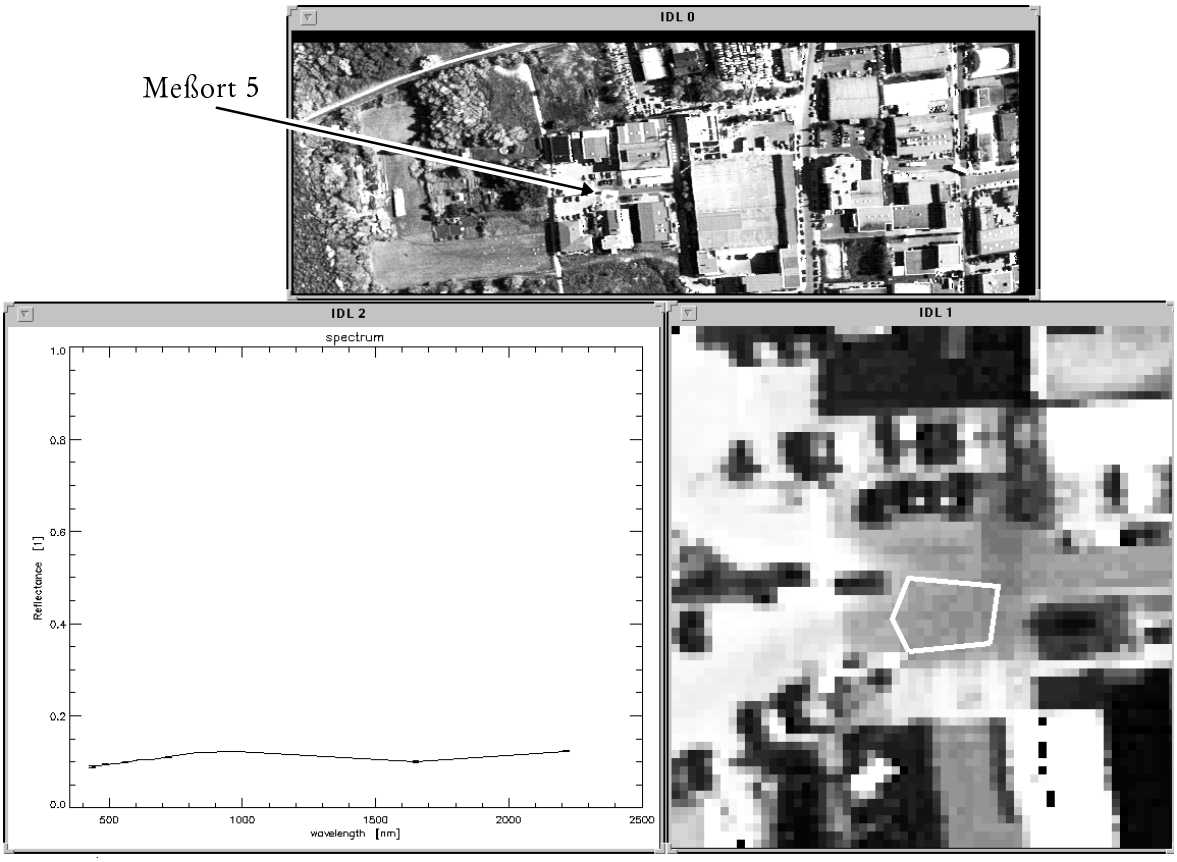

Abb. 29: Ausgabe des Programmes „clippolyzoom“ für Meßort 5 (siehe Pfeil, links unten: Reflektanzspektrum mit Fehlerbalken)

Das Programm erzeugte eine Ausgabedatei, die das Mittelwertspektrum sowie die Standardabweichung der Umgebungspixel enthielt. Das Polygon konnte bei allen Meßorten so gewählt werden, daß die Umgebung mindestens 20 Pixel umfaßte und die relative Standardabweichung der relativen Reflektanz unter 0,5% lag.

5.1.3 Gegenüberstellung

Als einfache und naheliegende Darstellung der Spektren bietet sich Abb. 30 an. Damit ist es möglich, einen ersten Eindruck von der Übereinstimmung der Messungen zu bekommen. Als

Testflächen wurden, wie schon in 3.2.3 erwähnt, folgende Orte in Nürnberg und Umgebung gewählt:

1. neugebautes Flughafenvorfeld (West), noch nicht in Betrieb – heller Asphalt
2. Asphaltstreifen zwischen altem Vorfeld und Rasenfläche – dunkler Asphalt
3. Tennisplatz
4. Kunstrasen – Fußballfeld
5. Straßenasphalt im Gewerbegebiet – dunkler Asphalt
6. Naturrasen – Fußballfeld

Es fällt auf, daß die Spektren des IRIS im kurzwelligen Bereich ($\lambda \leq 1500$nm) bei nahezu allen Messungen bis zu 35% unterhalb (außer bei Testfläche 3), und im langwelligen bis zu 25% oberhalb der Daedalus-Spektren liegen. Zu vermuten ist deshalb, daß es sich bei diesen Differenzen um eine systematische Abweichung handelt.

Die Darstellung in Abb. 31 zeigt für jeden Daedalus-Kanal einen Graphen, in dem die Reflektanzwerte des IRIS gegen die des Daedalus linear aufgetragen sind. Mit Hilfe dieser Abbildung läßt sich nun relativ leicht erkennen, daß zwischen den IRIS- und den Daedalus-Reflektanzen ein linearer Zusammenhang bestehen könnte, denn die Meßorte liegen mit nur geringer Streuung auf einer Geraden. Im Idealfall sollte diese Gerade die Steigung eins haben, und durch den Nullpunkt verlaufen, dann wären die Reflektanzspektren identisch. Die Regressionsgeraden, berechnet aus den Meßorten, verläuft auch annähernd durch den Nullpunkt. Die Steigung jedoch weicht von eins ab, so daß es möglich ist, die Spektren durch einen Korrekturfaktor, der für jeden Daedalus-Kanal getrennt zu berechnen ist, weitgehend zur Deckung zu bringen.

Um Fehlinterpretationen vorzubeugen, wurde in Abb. 30, Abb. 32 und Abb. 33 bewußt auf die Darstellung der Fehlerbalken verzichtet, da der Fehler der Daedalus-Reflektanzen erstens nahezu unbekannt und zweitens vermutlich nicht statistischer Natur ist. So wurde bei der Interpretation auch mehr Augenmerk auf die qualitative als auf die quantitative Übereinstimmung der Reflektanzspektren gelegt.

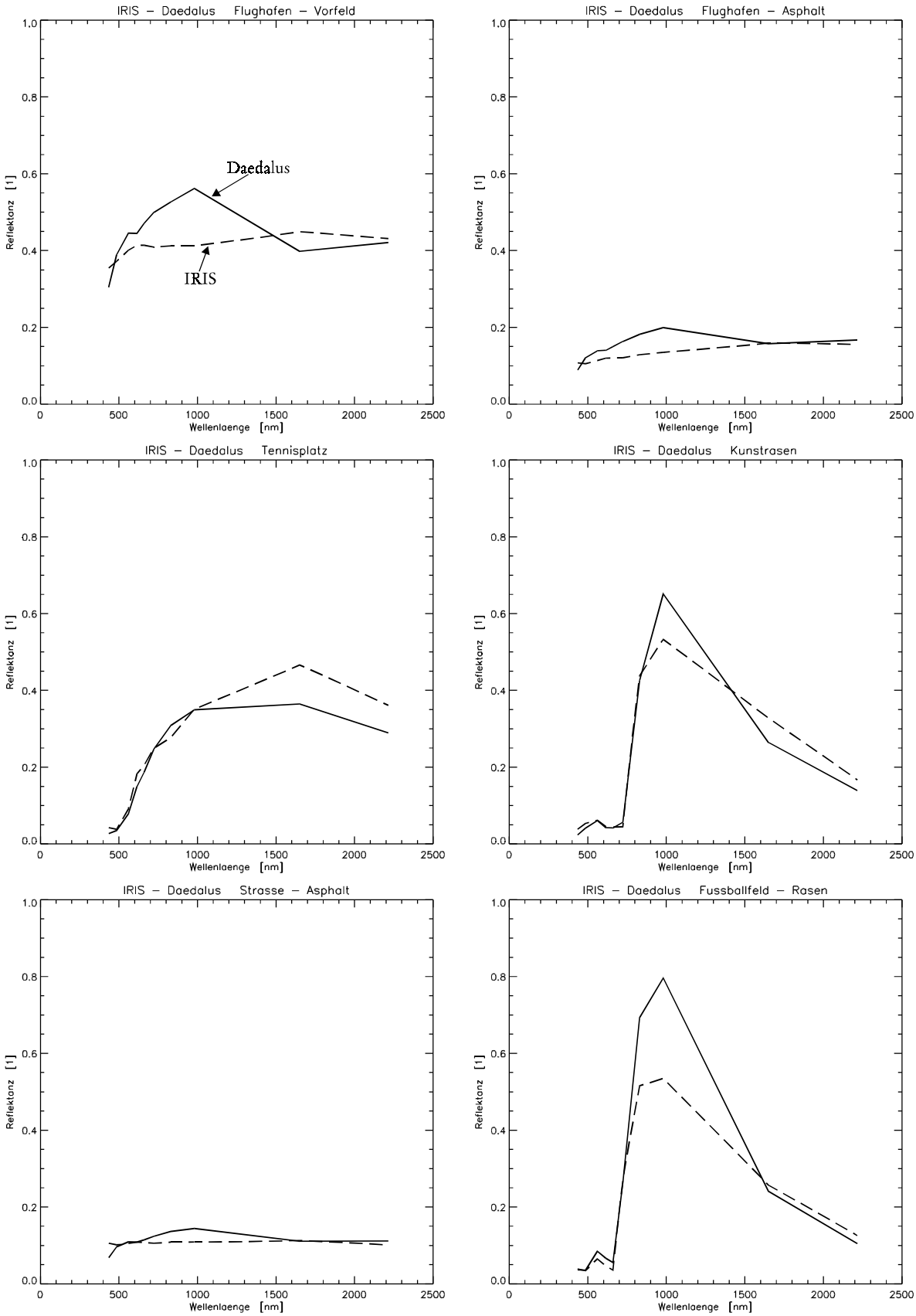

Abb. 30: Gegenüberstellung der Messungen IRIS – Daedalus

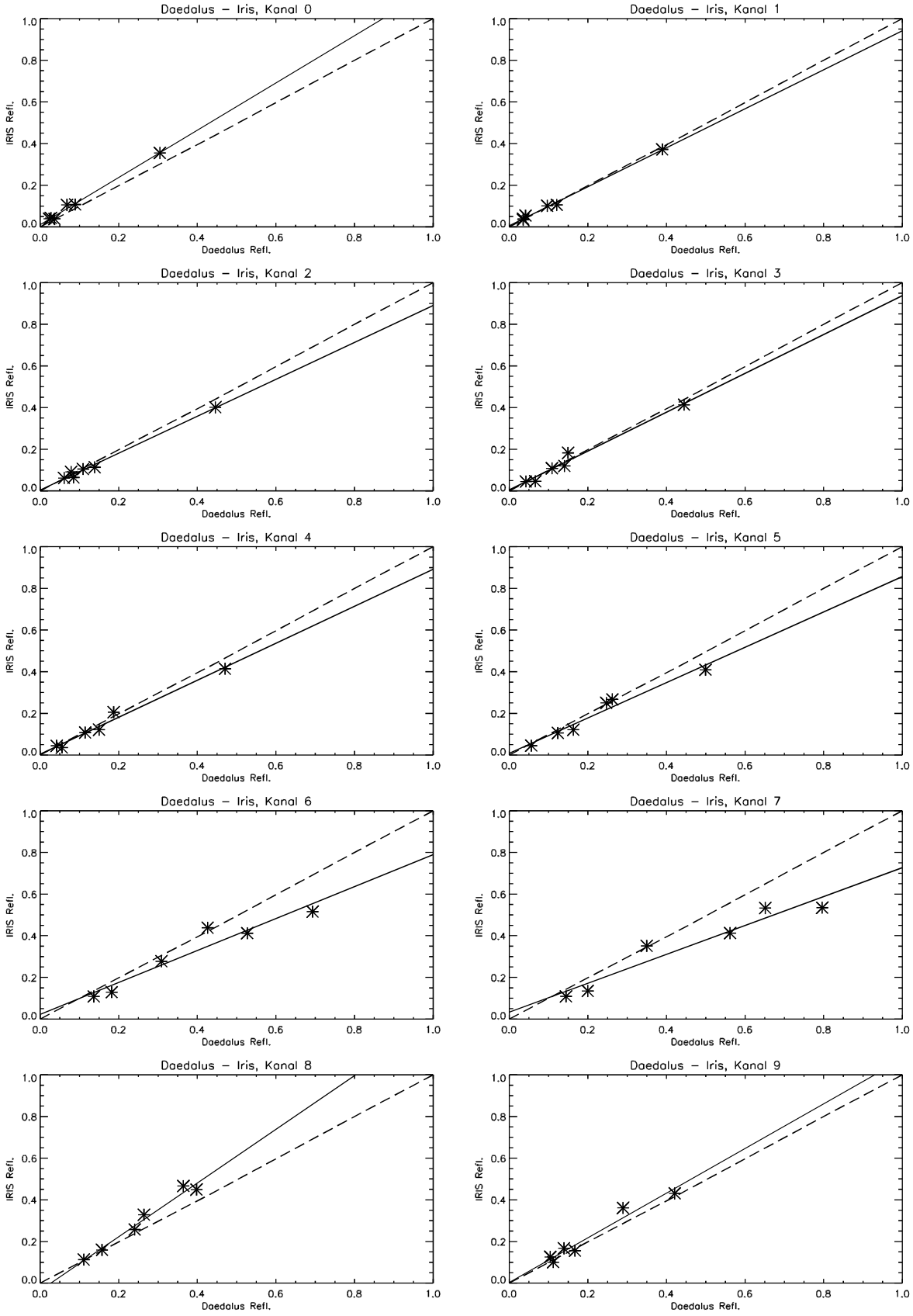

Abb. 31: Statistischer Zusammenhang zwischen IRIS- und Daedalus-Messungen (gestrichelt = optimale Übereinstimmung)

An dieser Stelle ist nun zu entscheiden, welche der beiden Messungen (IRIS oder Daedalus) die „richtigere“ ist, also die, die den tatsächlichen Reflektanzwerten am nächsten kommt.

Wie in 5.2 diskutiert, wird angenommen, daß sich mit den IRIS-Messungen die Reflektanzen besser bestimmen lassen als mit denen des Daedalus. Das bedeutet, daß in der langen Kette der Messungen und Berechnungen zur Erzeugung der Reflektanzbilder aus den Daedalus-Daten ein undefinierter Fehler vorhanden sein muß.

Schon erwähnt wurde, daß ein Fehler in den Daedalus-Reflektanzwerten zu vermuten ist, der sich in jedem Kanal nur durch einen konstanten Faktor (einen pro Kanal) von den „echten“ (IRIS–) Daten unterscheidet. Diese Korrekturfaktoren entsprechen den Steigungen der Regressionsgeraden in Abb. 31.

Werden nun die Reflektanzbilder mit diesen Faktoren korrigiert, so ergibt sich bei erneuter Gegenüberstellung mit den IRIS-Messungen Abb. 32. Dieses Ergebnis ist wenig zufriedenstellend. Ursache hierfür könnte sein:

- Die Daedalus-Reflektanzwerte zeigen so gut wie keinen systematischen Zusammenhang mit den „echten“ Reflektanzwerten.
- Der Fehler der Daedalus-Reflektanzen läßt sich nicht linear korrigieren.
- Zur Bestimmung der Korrekturfaktoren wurden auch Meßorte herangezogen, deren Reflektanzwerte, durch erklärbare Ursache, Differenzen zwischen den IRIS– und den Daedalus-Messungen zeigen dürfen.

Der erste Punkt dieser Überlegungen scheint nicht zutreffend zu sein, da sowohl der Daedalus-Scanner, als auch sämtliche Bearbeitungsschritte zur Erzeugung der Reflektanzbilder die Annahme zulassen, daß die Ergebnisse (Bilder) keine Anhäufung von Zufallszahlen sind.

Der zweite Punkt kann nicht so ohne weiteres verworfen werden. Der Aufwand, einen nichtlinearen Zusammenhang zu finden, ist aber relativ groß. Es erscheint sinnvoll, sich zuerst am dritten Punkt zu versuchen. Dieser dritte Punkt wird sich im Folgenden als richtig herausstellen.

Um herauszubekommen, ob sich unter den sechs Meßflächen einige befinden, die nicht geeignet sind, um für die „Eichung“ des Daedalus herzuhalten, müssen zuerst die Meß– und Aufnahmebedingungen betrachtet werden. Augenscheinliche Differenzen der Aufnahmegeometrien zwischen den Daedalus- und den IRIS-Messungen sind:

- Der Daedalus-Scanner tastet die Oberfläche in Winkeln zwischen -43° und +43° ab. Das IRIS hingegen mißt immer senkrecht zur Meßfläche (Zenith).
- Die Messungen von Daedalus und IRIS sind i.a. nicht zeitgleich erfolgt, so daß sich der Sonnenstand von IRIS- zu Daedalus-Messung unterscheidet.

Diese möglichen unterschiedlichen Aufnahmebedingungen können insbesondere bei Oberflächen, die von dem Modell des Lambert-Reflektors stark abweichen, zu Differenzen in den Reflektanzwerten führen. Es ist demnach sinnvoll, nur Flächen in die Daedalus-Korrektur einfließen zu lassen, die möglichst wenig vom Lambert-Reflektor abweichen.

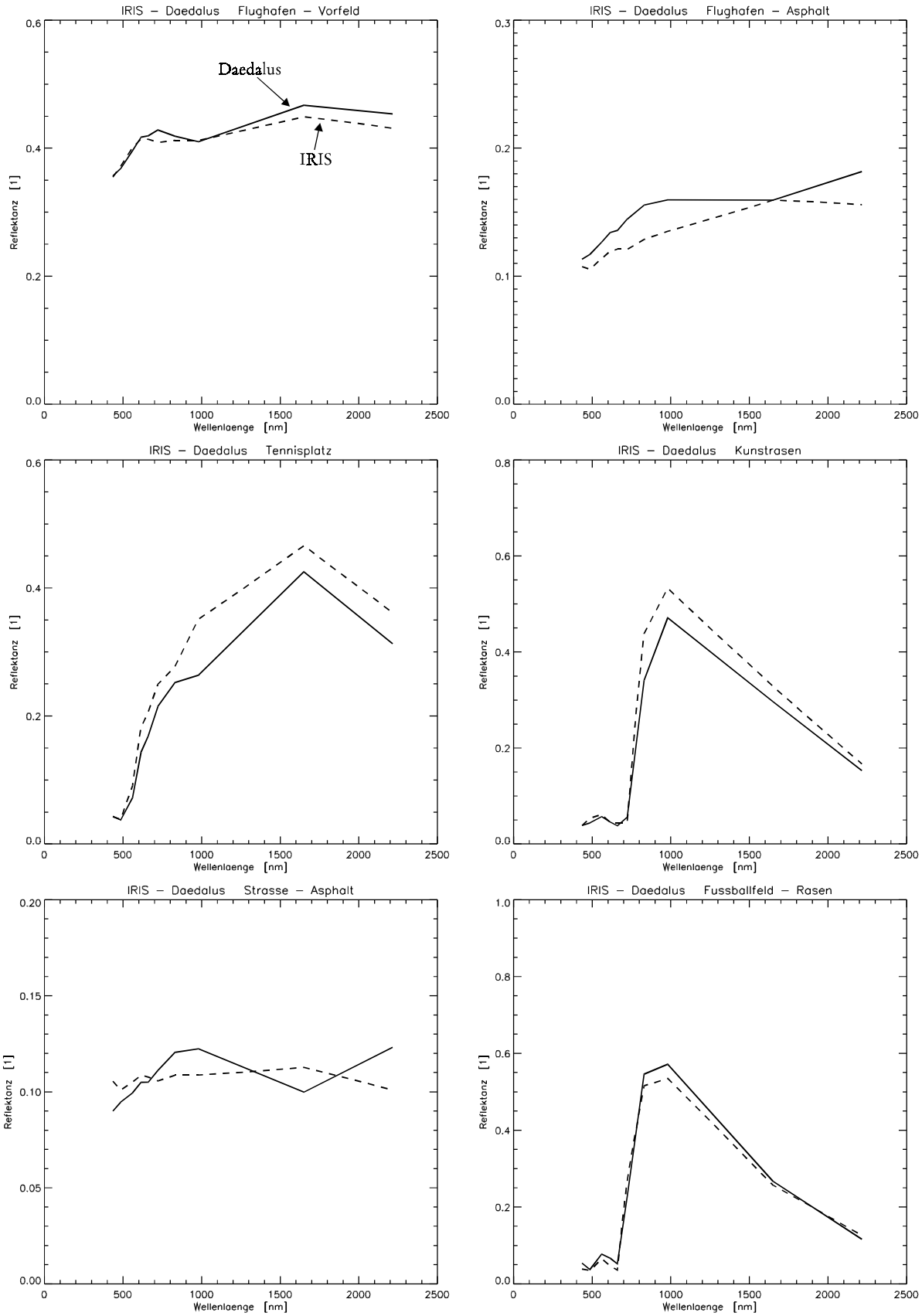

Abb. 32: Gegenüberstellung der Messungen IRIS – Daedalus.
Korrektur der Daedalus-Spektren mit allen IRIS-Testflächen

Betrachtet man die Strukturen der Oberflächen, so ergeben sich für die einzelnen Meßflächen folgende Aussagen:

- *Kunstrasen und Fußballfeld–Rasen (Flächen 4 und 6)*: Der Kunstrasen und der natürliche Rasen (Fußballfeld) zeigen eine große Ähnlichkeit, nicht nur in ihrer Oberflächenstruktur, sondern auch in den Spektren. Die beiden Rasenflächen bestanden aus ca. 3–4 cm hohen Grashalmen, die, wie es für Vegetation typisch ist, sehr viel Schatten erzeugen. Diese Schattenbildung führt dazu, daß ein Beobachter mit einer Blickrichtung, die einen kleinen Winkel mit der Sonnenstrahlung einschließt, weniger von dem Schatten sieht, als ein Beobachter der „gegen die Sonne" blickt, da der Schatten aus Richtung der Sonne betrachtet, von den Gräsern teilweise (bis zu 50%) verdeckt wird („Hot-Spot-Effekt"). Die Annahme, diese Flächen seien Lambert–Reflektoren ist also absolut unzutreffend.

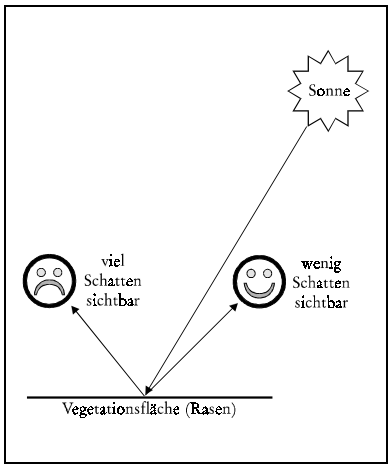

Abb. 33: Messung von Rasen und Tennisplatz

- *Tennisplatz (Fläche 3)* : Dieser Tennis–Sandplatz war belegt mit einem roten, groben, sandähnlichen Granulat. Dieses Granulat, das zum großen Teil locker auf einer festeren Schicht liegt, zeigt ähnliche Eigenschaften, wie die Grasfläche, da auch hier eine Schattenbildung der Granulatteilchen zu erkennen ist.
- *Flughafen–Vorfeld, Flughafen–Asphalt und Straße–Asphalt (Flächen 1, 2 und 5)*: Diese Oberflächen sind makroskopisch gesehen sehr glatt. Im Gegensatz zu den Rasenflächen und dem Tennisplatz tritt hier keine Schattenbildung auf, was die Annahme zuläßt, daß diese Flächen unter den 6 Meßflächen dem Lambert–Reflektor am ähnlichsten sind. Mikroskopisch betrachtet, sind die Oberflächen rauh, so daß die spiegelnde Komponente klein ist.

Diese Überlegungen führten zu der Entscheidung, eine Kalibrierung des Daedalus–Scanners nur mit den Flächen 1,2 und 5 durchzuführen (siehe Tabelle 8). Die Gegenüberstellung Daedalus–IRIS mit dieser Korrektur ergibt Abb. 34. Aus der Abbildung ist zu ersehen, daß die Übereinstimmung der Messungen bei den Asphaltflächen jetzt sehr gut ist (was keine Selbstverständlichkeit ist, obwohl diese Flächen die Grundlage zur Korrektur darstellen). Aber auch die Reflektanzen der anderen Flächen zeigen qualitativ eine deutlich bessere Übereinstimmung der Spektren.

Kanal	Offset	Faktor
0	0,02	1,09
1	0,00	0,95
2	0,00	0,90
3	0,00	0,93
4	0,00	0,88
5	0,00	0,83
6	-0,01	0,79
7	0,00	0,74
8	-0,02	1,18
9	-0,02	1,07

Tabelle 8: Korrekturfaktoren für die Daedalus-Reflektanzberechnung

Es läßt sich also festhalten, daß es durchaus möglich ist, eine gute Kalibrierung des Daedalus-Scanners mit IRIS–Messungen an gut ausgewählten Flächen vorzunehmen. Wichtig ist dabei vor allem, daß diese Flächen dem Modell des Lambert-Reflektors möglichst nahe kommen.

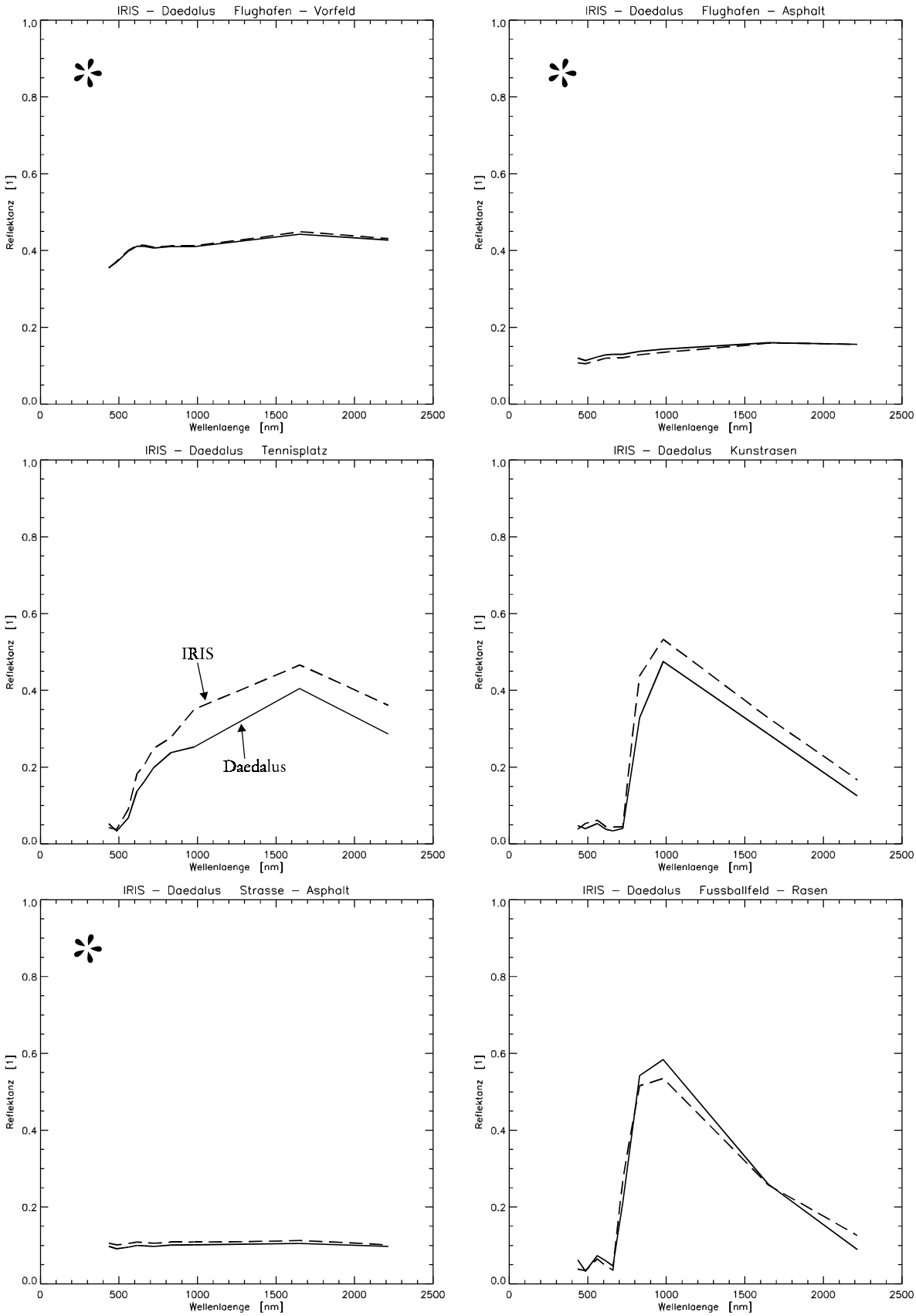

Abb. 34: Gegenüberstellung der Messungen IRIS – Daedalus.
Korrektur der Daedalus-Spektren mit ausgewählten IRIS-Testflächen (*)

5.2 Vergleich mit Daedalus-Messungen aus Vorjahren

Zur Entscheidung, die IRIS-Messungen den Daedalus-Eichungen mit der Testbench zur Kalibrierung des Daedalus-Scanners vorzuziehen, hat nicht unwesentlich die Gegenüberstellung der Daten mit Daedalus-Messungen aus Vorjahren beigetragen. Diese Messungen aus den Jahren 1991 und 1992 wurden zwar auch, wie die Daten aus 1994, ohne Bodenmessungen kalibriert, jedoch zeigen die Reflektanzwerte aus diesen Jahren qualitativ eine bessere Übereinstimmung mit den IRIS-Daten als mit den Daedalus-Daten aus 1994 (Abb. 35). Diese Tatsache läßt sich eventuell damit erklären, daß bei der Kalibrierung mit der Daedalus-Testbench 1994 ein Fehler gemacht wurde. Besonders Kanal 8 des Daedalus zeigt systematisch „Ausreißer nach oben". Kanal 9 hingegen zeigt bei allen Meßorten zu kleine Werte.

Der Meßort „Flughafen–Vorfeld" konnte nicht mit 1991 und 1992 verglichen werden, da diese helle Asphaltfläche erst 1994 erbaut wurde.

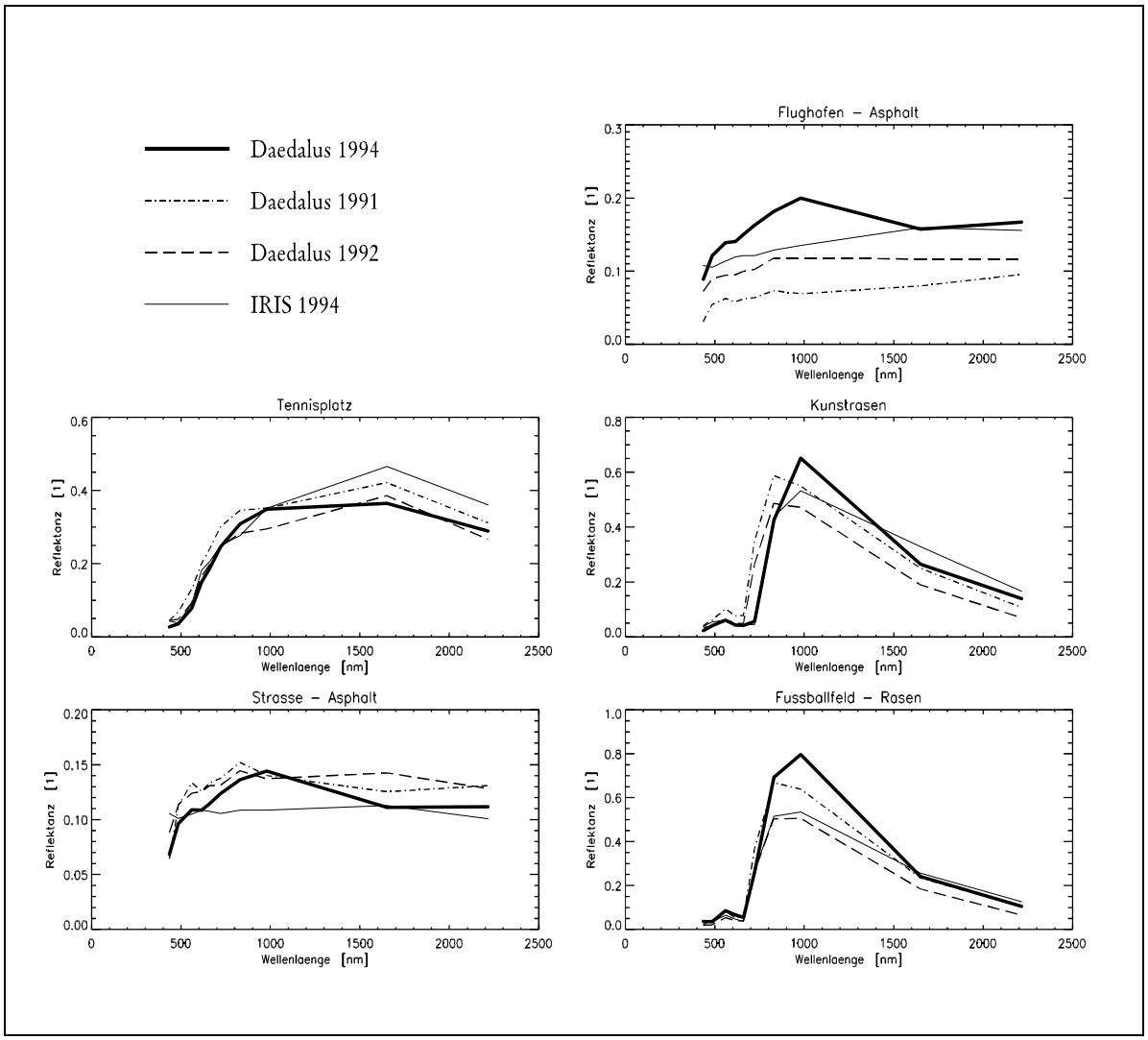

Abb. 35: Gegenüberstellung der Jahre 1991, 1992 und 1994 und der IRIS-Meßdaten

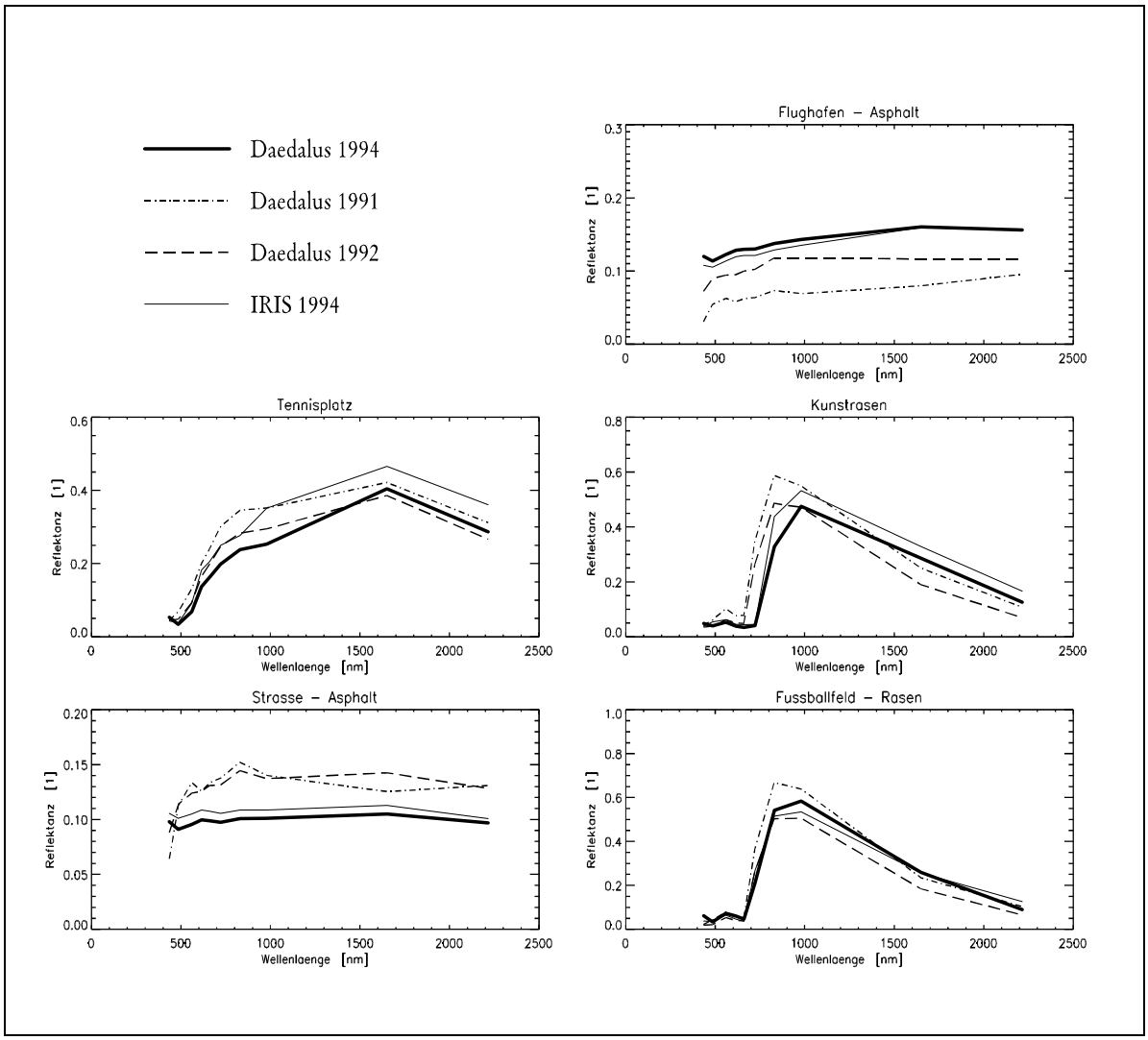

Abb. 36: Gegenüberstellung der Jahre 1991, 1992 und 1994 und der IRIS-Meßdaten (die Daedalus-Daten von 1994 mit den IRIS-Bodenmessungen korrigiert)

Abb. 36 zeigt schließlich die Gegenüberstellung der Daten mit der Kalibrierung des Daedalus durch die IRIS-Messungen. Ein Versuch, die in dieser Abbildung noch auftretenden quantitativen Differenzen zu erklären, ergibt folgendes:

- *Tennisplatz*: Der Tennisplatz ist keine natürliche Fläche, und die Oberflächenbeschaffenheit hängt stark davon ab, ob auf dem Platz gerade gespielt, oder frisch gefegt wurde. Der Platz wird außerdem regelmäßig mit Wasser besprengt, so daß der Feuchtigkeitsgehalt der Oberfläche variieren kann.
- *Kunstrasen*: Wie Nachfragen ergaben, wird auch der Kunstrasen regelmäßig feuchtgehalten. Durch die anzunehmende Anreicherung mit Moos und Algen ist so der für Vegetation typische Anstieg im nahen Infrarot zu erklären. Außerdem gilt, wie auch für den Naturrasen (Fußballfeld), daß die Reflektanz stark vom Sonnenstand abhängt (vgl. „Hot-Spot-Effekt“, S. 51).
- *Fußballfeld-Rasen*: Zusätzlich zum Hot-Spot-Effekt kommt beim Naturrasen, wie bei allen anderen Vegetationsflächen, natürlich noch die jahreszeitlichen Schwankungen hinzu.
- *Straße-Asphalt*: Diese Fläche erscheint 1994 dunkler als 1991/1992. Eine mögliche Erklärung wäre der Gummiabrieb der Fahrzeugreifen.

- *Flughafen*-Asphalt: Die großen Differenzen, die bei dieser Fläche über die Jahre auftreten, bedurften einer genaueren Untersuchung, die im Folgenden aufgezeigt ist.

Die rein visuelle Betrachtung dieser Meßfläche (Abb. 37) läßt schon vermuten, daß die Asphaltfläche von einer Messung zur nächsten erneuert wurde. Der Vergleich mit der Start-/Landebahn des Flughafens zeigt dies deutlich. Diese behält ihre Reflektanz annähernd bei, wie auch der Gegenüberstellung der Spektren in Abb. 38 zu entnehmen ist. So läßt sich das Ansteigen der Helligkeit des Meßortes „Flughafen-Asphalt“ mit einer jährlichen Erneuerung der Oberfläche erklären.

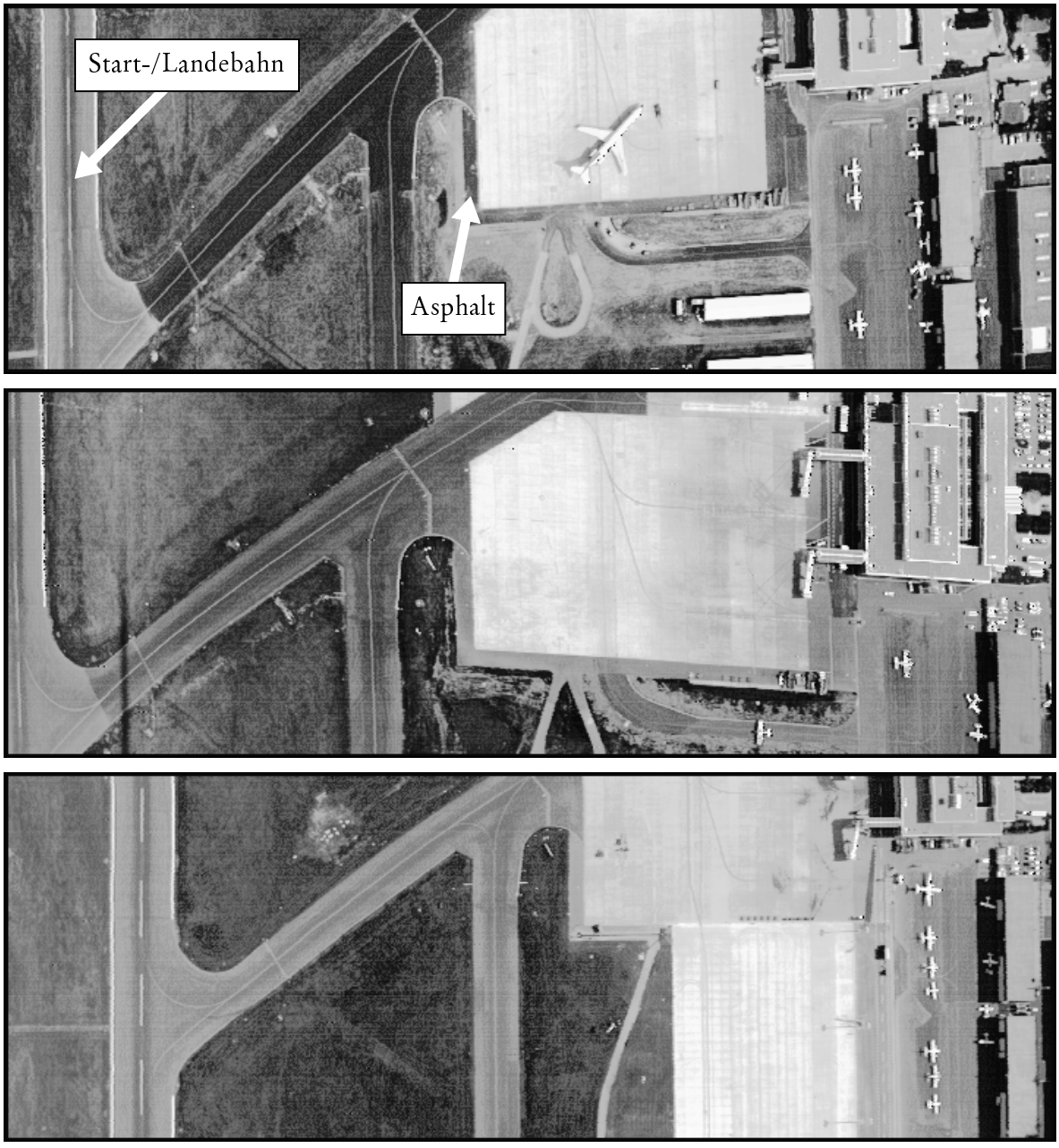

Abb. 37: Entwicklung der Meßfläche „Flughafen-Asphalt“ von 1991, 92 und 94 (Kanal 3)

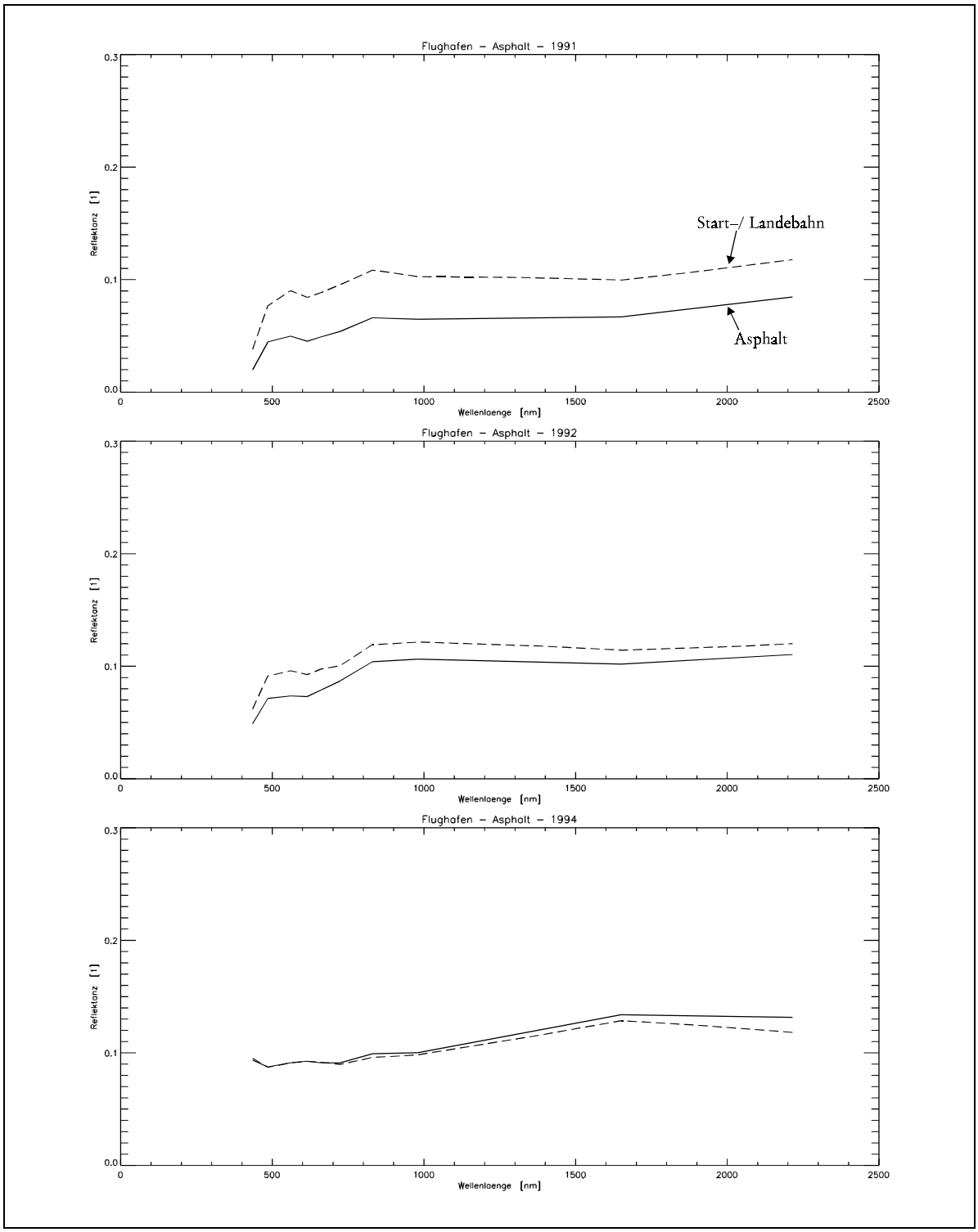

Abb. 38: Reflektanzspektren des Meßortes „Flughafen–Asphalt“ von 1991, 92 und 94

An diesem Beispiel wird sehr deutlich, daß es bei einem Auswahlvorgang von Meßflächen zu multitemporalen Vergleichszwecken dringend notwendig ist, nicht nur die physikalisch-strukturellen Eigenschaften der Oberflächen zu kennen, sondern auch die Möglichkeiten der zeitlichen Änderungen abschätzen zu können. Diese Veränderungen, die eventuell sehr klein sind, lassen sich bei den meisten Oberflächen nur sehr schwer bestimmen oder gar berechnen, so daß bei einem quantitativen Vergleich von Messungen von ein und derselben Fläche zu verschiedenen Zeitpunkten Vorsicht geboten ist.