

# ANSÄTZE ZUR VALIDIERUNG VON FOOTPRINT MODELLEN BASIEREND AUF AUSTAUSCHMESSUNGEN NATÜRLICHER TRACER

M. GÖCKEDE<sup>1</sup>, T. MARKKANEN<sup>2</sup>, S. RETH<sup>3</sup>, K. ARNOLD<sup>4</sup>, J.-P. LEPS<sup>5</sup> und T. FOKEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Abteilung für Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Deutschland*

<sup>2</sup>*Department of Physical Sciences, Universität Helsinki, Finnland*

<sup>3</sup>*Abteilung für Pflanzenökologie, Universität Bayreuth, Deutschland*

<sup>4</sup>*Meteorologisches Institut, Universität Leipzig, Deutschland*

<sup>5</sup>*Observatorium Lindenberg, Deutscher Wetterdienst, Deutschland*

## 1 EINLEITUNG

Mikrometeorologische Messungen werden von einem Gebiet in der Umgebung des Instruments beeinflusst, welches mit den atmosphärischen Bedingungen in Größe und Position variiert. Dieses sogenannte ‚Blickfeld des Sensors‘ erstreckt sich, mit Ausnahme von Strahlungsmessungen, entgegen der Windrichtung (Gash, 1986), und kann sich zusammen setzen aus einer Vielzahl von verschiedenen Formen von Quellen oder Senken. Dieser räumliche Zusammenhang wird allgemein als der ‚Footprint‘ einer Messung bezeichnet. Footprint Analysen haben in den letzten Jahren in dem Maße an Bedeutung gewonnen, in dem das Fachgebiet der Mikrometeorologie der Untersuchung von Austauschprozessen zwischen Unterlage und Atmosphäre in heterogenem Gelände mehr und mehr Aufmerksamkeit widmet (Schmid, 2002). Dies spiegelt sich u.a. in langfristigen Messprogrammen wie beispielsweise FLUXNET (Baldocchi et al., 2001) oder EUROFLUX (Valentini et al., 2000) wider. An heterogenen Standorten kann eine Footprint Analyse dazu verwendet werden, den Einfluss von störenden Geländeelementen auf die Messung zu bewerten, und somit die Qualität der Messdaten zu interpretieren. Zusätzlich ist für diejenigen Stationen, welche repräsentative Daten liefern sollen für einen bestimmten Landnutzungstyp, eine Bestimmung des Flussanteils dieser Teilfläche von elementarer Bedeutung für die Bewertung der Ergebnisse.

Aufbauend auf grundlegenden Arbeiten von Pasquill (1972) und Gash (1986) wurden gegen Ende der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts die ersten Footprint Modelle für Konzentrationen (Schmid und Oke, 1988, 1990) und Flüsse (Schuepp et al., 1990) entwickelt. Über die Vielzahl der seitdem entstandenen Footprint Ansätze wurde von Schmid (2002) ein ausführlicher Überblick zusammen gestellt. Der Kern aller bestehenden Footprint Modelle ist die Definition einer Transferfunktion zwischen Quelle beziehungsweise Senke für die zu modellierende Größe und der Sensorposition. Unterschiede existieren nach Schmid (2002) in der Art der modellierten Größe (z.B. skalarer Fluss, oder skalarer Gradient), dem mathematischen Konzept auf dem die Transferfunktion basiert (z.B. Euler’sche Analytik, oder Lagrange’sche Stochastik), den Einsatzbedingungen bezüglich des turbulenten Strömungsfeldes (z.B. horizontal homogen bzw. heterogen, oder adiabatische bzw. diabatische Schichtung), sowie dem Definitionsbereich der Modellierung (z.B. Bodenschicht).

Arbeiten zur Verifizierung beziehungsweise Falsifizierung bestehender Footprint Ansätze in ihren üblichen Einsatzbereichen sind bislang kaum veröffentlicht worden (z.B. Foken und Leclerc, 2004). Viele der publizierten Footprint Modelle wurden jedoch verglichen mit zum jeweiligen Zeitpunkt schon bestehenden Ansätzen (z.B. Leclerc und Thurtell, 1990; Horst und Weil, 1992; Flesch et al., 1995; Haanel und Grünhage, 1999; Kljun et al., 2002). Nur wenige weitere Veröffentlichungen konzentrieren sich auf spezifische Modellvergleiche basierend auf theoretischen Studien (z.B. Kljun et al., 2003) beziehungsweise auf Experimentdaten mit künstlichen Tracern (z.B. Finn et al., 1996; Leclerc et al., 2003a, 2003b). In diesen Studien wurden teilweise gute oder zumindest zufriedenstellende Übereinstimmungen zwischen unterschiedlichen Modellansätzen gefunden, solange alle Modelle innerhalb ihres definierten Gültigkeitsbereichs betrieben wurden (Leclerc et al., 2003a, 2003b), teils jedoch auch deutliche Unterschiede aufgedeckt (z.B. Kljun et al., 2002, 2003). Die in der Literatur beschriebenen Modellunterschiede zwischen unterschiedlichen Footprint Ansätzen konzentrieren sich aber vor allem auf die Abgrenzung der atmosphärischen Strömungsbedingungen, für die sie gültig sind.

Theoretische Footprint Vergleiche, beispielsweise die Überprüfung eines neuen Modells anhand der Daten eines schon bestehenden, oder auch die Validierung einfacher Ansätze mit Hilfe von LES generierten Datensätzen (z.B. Leclerc et al., 1997), verbleiben durchgehend auf der Ebene der Modellierung. Dafür ist teilweise der Einsatz von aufwändiger Rechentechnik notwendig. Das Problem dieser Methode besteht aber vor allem darin, dass sie trotz erfolgreicher Vergleiche nicht in der Lage ist, diejenigen zu überzeugen, welche das Footprint Konzept generell in Frage stellen. Die genaueste experimentelle Variante zur Validierung von Footprint Modellen besteht in der Durchführung von Experimenten mit künstlichen Tracergasen wie zum Beispiel Schwefel-Hexafluorid ( $\text{SF}_6$ ). Der Einsatz von  $\text{SF}_6$  bietet zahlreiche Vorteile, beispielsweise das Fehlen natürlicher Quellen oder Senken, die Trägheit bezüglich chemischer Umsetzung, und eine schlechte Adsorption an Oberflächen. Mit diesem Konzept wurden mehrere Studien erfolgreich durchgeführt (Finn et al., 1996; Leclerc et al., 2003a, 2003b), ein umfassender Überblick über die Ergebnisse findet sich bei Foken und Leclerc (2004). Weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der künstlichen Tracergase konzentrieren sich auf die Verwendung von multiplen Tracer Techniken zur dreidimensionalen Footprint Validierung. Jedoch werden für diese Art der Experimente sehr aufwändige Detektoren und Analysetechniken benötigt, wodurch sowohl die Kosten als auch der Arbeitsaufwand sehr hoch ausfallen.

Das Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, einfache und kostengünstige experimentelle Ansätze zu testen auf ihre Eignung zur Validierung von Footprint Modellen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Messung natürlicher Tracer unter Experimentbedingungen mit einfacher, klar definierter horizontaler Heterogenität. Zur Footprint Modellierung verwendet werden das analytische ‚Flux Source Area Model‘ (FSAM) von Schmid (1994, 1997), sowie das Trajektorien-Modell mit Lagrange’scher Stochastik (im weiteren mit LS abgekürzt) von Thomson (1987) in der von Rannik et al. (2003) parametrisierten Version. Die verwendeten Experiment-Ansätze umfassen Parallelmessungen mehrere Eddy Kovarianz Stationen mit unterschiedlichem Einzugsgebiet, Linien-Messungen mit Scintillometern in heterogenem Gelände, sowie einen Vergleich von Eddy Kovarianz Stationen mit Bodenkammer-Messungen. Die dabei erfassten natürlichen Tracer sind der Impulsfluss, der fühlbare Wärmestrom, und der  $\text{CO}_2$ -Austauschfluss.

## 2 FOOTPRINT MODELLE

Das erste im Rahmen dieser Studie verwendete Footprint Modell ist das analytische Flux Source Area Model FSAM von Schmid (1994, 1997). Wie alle analytische Footprint Modelle wird hier eine Euler’sche analytische Beschreibung der Advektions-Diffusions-Gleichung zur Berechnung der mittleren Verteilung eines passiven Skalars im stationären, turbulenten Strömungsfeld verwendet. Der Einsatz ist auf die atmosphärische Grenzschicht beschränkt, und erfordert horizontal homogene Strömungsfelder, da es auf der sogenannten ‚inverted plume assumption‘ (z.B. Schmid und Oke, 1988) basiert, welche eine Analogie annimmt zwischen einer diffundierenden Fahne eines passiven Tracers aus einer Punktquelle, und dem Einfluss eines Geländeelements auf eine Sensorposition. Analytische Modelle gehen von Gauss’schen Verteilungsfunktionen quer zur Hauptwindrichtung aus, während turbulente Diffusion entlang dieser Hauptwindrichtung nicht berücksichtigt wird.

Der von Schmid (1994, 1997) verwendete Footprint Algorithmus basiert auf der Arbeit von Horst und Weil (1992), und verwendet eine erweiterte Version des Dispersionsmodells für die atmosphärische Bodenschicht von Gryning et al. (1987) zur Bestimmung der Verteilungsfunktionen für die modellierte Konzentration. Durch die Verwendung des Gryning et al. (1987) Modells kann FSAM nur noch numerisch gelöst werden. FSAM geht von höhenkonstanten Flüssen aus, und kann nur Quellen beziehungsweise Senken an der Oberfläche berücksichtigen. Vertikale Flussdivergenzen werden vernachlässigt, während laterale beziehungsweise vertikale Diffusion getrennt betrachtet werden. FSAM wurde für die hier vorgestellten Studien ausgewählt, weil es anstatt der für analytische Footprint Modelle üblichen Querwind integrierten Footprints (z.B. Horst und Weil, 1992; Horst, 1999) eine zweidimensionale Quellgewichtsfunktion ausgibt. Zudem wird die Option angeboten, die berechneten Quellgebiete, welche für bis zu 90 Prozent des emittierten Flusses berechnet werden können, mit Hilfe einfacher charakteristischer Parameter zu speichern.

Das zweite im Rahmen dieser Vergleichsstudie verwendete Modell ist das Vorwärts-LS Trajektorienmodell von Thomson (1987) in der von Rannik et al. (2003) parametrisierten Version. Im Vergleich zu den analytischen Modellen sind LS Footprint Modelle in der Lage, nicht-Gauss'sche inhomogene Turbulenzbedingungen nachzuvollziehen, sowie dreidimensionale Diffusion zu berücksichtigen (z.B. Reynolds, 1998). Auch bei diesen Ansätzen wird eine stationäre Strömung voraus gesetzt. Ein großer Vorteil der LS Modellierung ist, dass der Modellierungsraum in verschiedene vertikale Schichten eingeteilt werden kann (z.B. Baldocchi, 1997; Rannik et al., 2000, 2003), und nicht mehr auf die atmosphärische Bodenschicht begrenzt ist. Zudem kann im Prinzip eine beliebige vertikale Verteilung der Quellen und Senken in die Berechnung mit einbezogen werden. Modelle, die im Vorwärts-Lagrange-Modus betrieben werden (z.B. Leclerc und Thurtell, 1990; Baldocchi, 1997; Rannik et al., 2000, 2003) basieren wie die analytischen Modelle auf der inverted plume assumption, und sind daher beschränkt auf horizontal homogene Strömungsbedingungen.

Das Rannik et al. (2003) Modell kann auch in diabatischen Schichtungen betrieben werden, und berücksichtigt in seiner Vollversion auch Flüsse innerhalb des Vegetationsraums. Für die vorliegende Studie wurde jedoch nur die Modellierung von Trajektorien in der atmosphärischen Grenzschicht durchgeführt, da hier die Quellgebiete für Sensoren in wenigen Metern Höhe über niedriger Vegetation benötigt wurden. Die Simulationen umfassten die Freisetzung von  $5 \cdot 10^4$  Partikeln aus einer Höhe dicht am Erdboden, welche bis zu einer Entfernung verfolgt wurden innerhalb derer etwa 90 Prozent des Gesamtflusses emittiert wurden. Um Rechenzeit zu sparen wurden die Quellgebiete vorberechnet für eine Vielzahl von Kombinationen der Eingabeparameter Messhöhe, Obukhov-Länge, und Rauigkeitslänge, und anschließend in Tabellenform gespeichert.

Kljun et al. (2002) veröffentlichten eine Vergleichsstudie der beiden oben aufgeführten Modelle mit dem Rückwärts-LS Modell LPDM-B. Dabei ergab sich für den Vergleich von LPDM-B mit FSAM eine lediglich zufriedenstellende Übereinstimmung, wobei vor allem in neutraler Schichtung Unterschiede beobachtet werden konnten. Diese Abweichungen sind zurück zu führen auf die Anpassung einiger interner Parameter in FSAM an stark konvektive Bedingungen, welche für alle Stabilitätsklassen konstant gehalten werden (Kljun et al., 2002). Zudem wurde die Vernachlässigung von longitudinaler Dispersion in FSAM als entscheidender Faktor für generelle Unterschiede zwischen den Modellen bestimmt. Der Vergleich von LPDM-B mit dem Vorwärts-LS Modell von Rannik et al. (2000) zeigte dagegen eine exzellente Übereinstimmung zwischen diesen Modellen. Daher kann davon ausgegangen werden dass die gefundenen Unterschiede zwischen LPDM-B und FSAM auch für einen Vergleich zwischen dem Rannik et al. (2000) LS Modell und FSAM gültig sind. Im weiteren wird in der Studie von Kljun et al. (2002) der stark reduzierte Einsatzbereich von FSAM bemängelt. Durch die Einschränkung auf moderate Stabilität der atmosphärischen Schichtung sowie die Annahme von Gauss'scher Turbulenz in horizontaler Richtung werden die realen Bedingungen zu stark vereinfacht. Diese Beschränkungen werden von beiden betrachteten LS Modelle überwunden.

### 3 VERGLEICHANSÄTZE MIT NATÜRLICHEN TRACERN

Die Verwendung von natürlichen Tracern zur Evaluierung von Footprint Modellen stellt eine vergleichsweise billige Alternative zu den Experimenten mit künstlichen Tracern dar. Als Tracer verwendet werden können beispielsweise die Flüsse von fühlbarer oder latenter Wärme, der  $\text{CO}_2$ -Fluss, oder Parameter des turbulenten Strömungsfeldes wie z.B. der Impulsfluss oder auch die Standardabweichungen der Windkomponenten. Der offensichtliche Vorteil dieses Ansatzes liegt vor allem in der für die Durchführung solcher Experimente benötigten einfachen Instrumentierung, welche auch in üblichen mikrometeorologischen Feldexperimenten oder an monitoring Stationen in FLUXNET eingesetzt wird (z.B. Aubinet et al., 2000). Bisher wurden allerdings nur wenige Studien veröffentlicht, welche natürliche Tracer für Footprint Studien einsetzen (z.B. Rannik et al., 2000; Cooper et al., 2003).

Die Grundanforderungen für ein Experiment, mit dessen Daten Footprint Evaluierungen durchgeführt werden können, ist die Existenz von deutlich variablen Quellen oder Senken für die verwendete Messgröße in der Umgebung des Sensors. Diese Bedingung kann ideal umgesetzt werden mit künstlichen Tracern, da hier außer der klar definierten Punktquelle keine weiteren Quellen oder Senken in der Umge-

bung existieren. Bei der Verwendung natürlicher Tracer dagegen verkompliziert sich die Situation durch eine Vielzahl von möglichen Quellen oder Senken. Daher ist ein Validierungsexperiment für Footprint Modelle mit natürlichen Tracern von den Unterschieden der Flüsse abhängig, die von den Flächen in der Umgebung des Sensors emittiert werden, sowie von deren Größe und Anordnung im Gelände. Als ideal gilt dabei der Fall von nur wenigen unterschiedlichen Typen von Quellflächen (im optimalen Fall liegen nur zwei Typen vor), mit sehr hohen Flussunterschieden und jeweils großen Einzelflächen in klar definierbaren Positionen. Die Möglichkeit, auf dieser Datengrundlage Korrelationen zu finden zwischen gemessenen Flüssen und den Footprint Ergebnissen verschiedener Modelle, kann weiter verbessert werden durch den simultanen Einsatz mehrerer Messkomplexe an Positionen im Gelände mit einer unterschiedlichen Zusammensetzung der Quellen und Senken im Einzugsgebiet.

In der vorliegenden Studie werden zwei unterschiedliche experimentelle Ansätze zur Footprint Validierung unter Verwendung von Messungen natürlicher Tracer getestet, welche in Abbildung 1 skizziert sind.

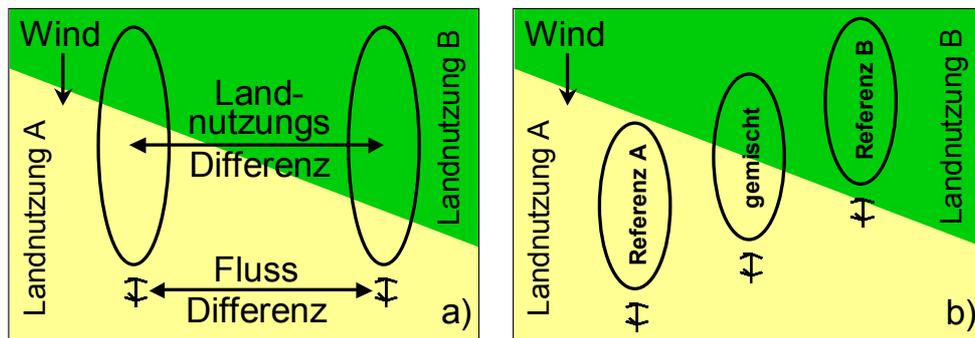


Abbildung 1: Skizzen zweier unterschiedlicher Konzepte zur Validierung von Footprint Modellen mit natürlichen Tracern. a) Korrelationsanalyse von Fluss-Differenzen und Landnutzungs-Differenzen für ein Paar von Messpositionen. b) Vergleich von Flüssen, die an einer Position mit gemischtem Einzugsgebiet gemessen wurden, mit modellierten Flüssen welche mit Hilfe von Flüssen an Referenz-Positionen und Footprint Ergebnissen berechnet wurden.

Der erste der beiden vorgeschlagenen Experimentansätze, skizziert in Abbildung 1a, basiert auf simultanen Messungen an mindestens zwei Positionen in einer Umgebung mit klar definierter horizontaler Heterogenität der Quellen beziehungsweise Senken. Die Positionen der Instrumente sollten so gewählt werden dass sich die Zusammensetzung ihres Einzugsgebiets möglichst deutlich unterscheidet, und dass dieses Verhältnis je nach Anströmung wechselt. Vorausgesetzt die Differenzen in den von den verschiedenen Landnutzungsarten emittierten Flüssen sind groß genug sollten sich auf diese Weise unterschiedliche Flussmessungen an den Positionen ergeben. Als Maß für die Qualität eines Footprint Modells kann jetzt gelten, inwiefern sich diese Flussunterschiede mit den modellierten Differenzen in der Zusammensetzung des Quellgebiets in einer Korrelationsanalyse erklären lassen.

Der zweite Experimentansatz, dargestellt in Abbildung 1b, setzt einen ähnlichen Aufbau wie der vorherige voraus, benötigt dabei allerdings mindestens drei Messpositionen. Davon sollte sich eine nahe dem Übergang zwischen zwei Landnutzungsarten mit verschiedener Quellstärke befinden, so dass sich das Einzugsgebiet stets aus verschiedenen Kombinationen dieser Quellen zusammen setzt. Zwei weitere Positionen werden benötigt, deren Einzugsgebiet möglichst ausschließlich von jeweils einer der beiden Landnutzungsarten gebildet wird, so dass die Messungen als Referenzdaten für diesen Typ der Quelle verwendet werden können. Für die Position mit gemischtem Einzugsgebiet werden nun mittels Footprint Analyse die genauen Anteile jeder Landnutzungsart an den Einzelmessungen bestimmt. Anschließend wird, unter Verwendung der Daten der Referenzstationen, ein modellierter Fluss berechnet unter Berücksichtigung der Gewichtungsfaktoren aus den Footprint Analysen. Ein Vergleich zwischen den aktuellen Flussmessungen der gemischten Position mit diesen modellierten Flüssen ist hier das Maß für die Qualität des verwendeten Footprint Modells.

## 4 ERGEBNISSE

### 4.1 EXPERIMENTELLER AUFBAU

Alle im weiteren Verlauf gezeigten Ergebnisse basieren auf Daten des Experiments STINHO2 (**ST**ruktur des turbulenten Transports über **INH**omogener Unterlage), welches im Zeitraum Juni bis Juli 2002 auf dem Messfeld Falkenberg des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg des Deutschen Wetterdienstes stattfand. Dieser Standort (14°07'27"E, 52°10'01"N, 73 m ü.NN) ist eingebettet in eine heterogene Landnutzungsstruktur mit einer leicht gewellten Orographie, welche von den Inlandgletschern der letzten Eiszeit geprägt wurde (z.B. Beyrich et al., 2002). Das Grenzschicht Messfeld in Falkenberg selbst ist flach und mit kurzem Gras bewachsen, während auf den angrenzenden Ackerflächen verschiedene Nutzpflanzen kultiviert werden. Das STINHO Projekt ist Teil des Forschungsverbunds VERTIKO (**VERT**ikaltransporte von Energie und Spurenstoffen an Ankerstationen und ihre räumliche/zeitliche Extrapolation unter **K**omplexen natürlichen Bedingungen), welcher die Messung und Modellierung von Vertikaltransporten in der atmosphärischen Grenzschicht als Flächenmittel über inhomogenem Gelände untersucht. Das Experiment vom Sommer 2002 hatte vor allem die Erstellung eines Datensatzes zur Initiierung eines Large Eddy Simulation Modells an den Untersuchungsstandort zum Ziel. Im Rahmen der hier vorgestellten Studie wurden vier Eddy Kovarianz Messkomplexe sowie drei Scintillometer Messstrecken als Datenquellen verwendet. Zusätzlich wurden in einem separaten Ansatz CO<sub>2</sub>-Flüsse aus Bodenkammer Messungen verglichen mit Daten der Eddy Kovarianz Instrumente. Abbildung 2 zeigt eine Skizze des Messfeldes sowie die Positionen der jeweiligen Instrumente. Details zu den verwendeten Messkomplexen sind in Tabelle 1 zusammen gestellt.

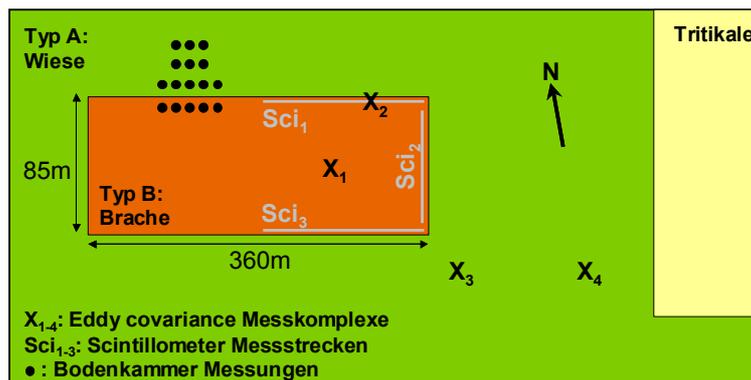


Abbildung 2: Skizze des experimentellen Aufbaus des STINHO2 Experiments, mit den Positionen der für die vorliegende Studie verwendeten Instrumente.

Tabelle 1: Details zu den im Rahmen dieser Studie verwendeten Messkomplexen. Zu den Abkürzungen siehe Abbildung 2.

Position	Instrument	Messhöhe	Pfadlänge
X <sub>1</sub>	METEK USA1	3.26 m	-
X <sub>2</sub>	Campbell CSAT1	2.00 m	-
X <sub>3</sub>	METEK USA1	2.35 m	-
X <sub>4</sub>	METEK USA1	2.35 m	-
Sci <sub>1</sub>	Scintec SLS20	1.60 m	139 m
Sci <sub>2</sub>	Scintec SLS20	1.60 m	86 m
Sci <sub>3</sub>	Scintec SLS20	1.60 m	140 m
Bodenkammern	non-steady-state flow-through closed chamber system		

#### 4.2 EINFLUSS DES FOOTPRINT MODELLS AUF DIE LANDNUTZUNGS-BESTIMMUNG

Die oben schon beschriebenen unterschiedlichen Eigenschaften der beiden in dieser Studie verwendeten Footprint Modelle haben einen signifikanten Einfluss auf die Berechnung der Anteile verschiedener Landnutzungsarten im Einzugsgebiet der Sensoren. Durch die Berücksichtigung der longitudinalen Diffusion sind die Maxima der Quellgewichtsfunktion beim LS Modell deutlich dichter an der Messposition im Vergleich zu FSAM. Wie in Abbildung 3 verdeutlicht kann das selbst bei niedrigen Messhöhen und fehlendem Vegetationseinfluss zu deutlichen Abweichungen führen.

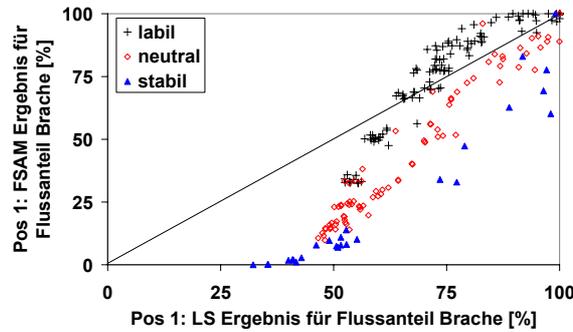


Abbildung 3: Vergleich zwischen den Ergebnissen von FSAM und LS Modell zum Flussanteil der Brache für die Eddy Kovarianz Messposition 1.

Abbildung 3 verdeutlicht dass der Einsatz des LS Modells den Anteil der direkt unterhalb der Messposition vorliegenden Landnutzungsart, in diesem Fall Brache, im Vergleich zu FSAM signifikant erhöht. Während die Unterschiede bei labiler Schichtung noch vernachlässigbar sind, zeigen sich stärkere Abweichungen mit zunehmender Stabilität der atmosphärischen Schichtung.

#### 4.3 FLUSS DIFFERENZEN GEGEN LANDNUTZUNGS DIFFERENZEN

Der in Abbildung 1a vorgestellte Validierungsansatz für Footprint Modelle, die Korrelationsanalyse zwischen Fluss-Differenzen und Landnutzungs-Differenzen, wurde sowohl mit Daten der Eddy Kovarianz Stationen als auch mit Scintillometerdaten erfolgreich durchgeführt. Im folgenden aufgeführt sind lediglich die Ergebnisse der Scintillometer Studie. Die Ergebnisse beider Footprint Modelle für einen Vergleich der Scintillometer Messstrecken 1 und 2 sind in Abbildung 4 zusammen gestellt.

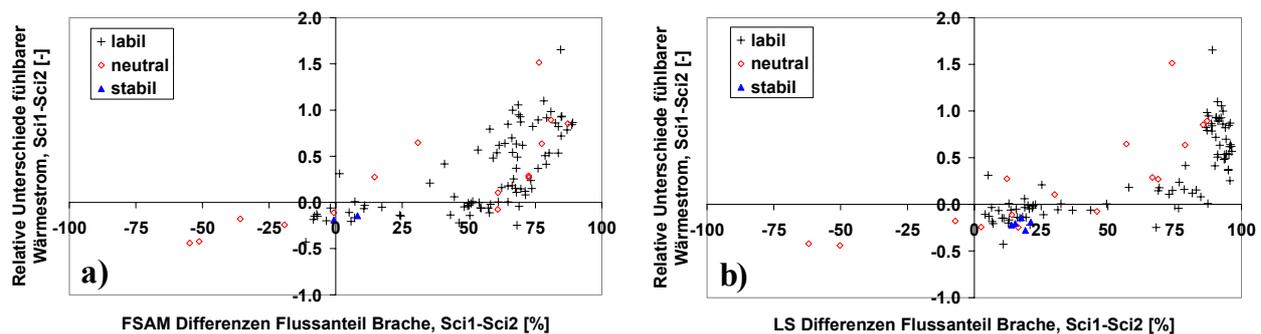


Abbildung 4: Zusammenstellung der Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen Fluss-Differenzen und Landnutzungs-differenzen für a) das analytische FSAM (Schmid, 1997), und b) das LS Modell nach Rannik et al. (2003). Verglichen wurden Messdaten der Scintillometer-Messstrecken 1 und 2.

In Abbildung 4 sind die normierten relativen Unterschiede des fühlbaren Wärmestroms, gemessen an den Scintillometer Messstrecken 1 und 2, aufgetragen gegen die mit den beiden Footprint Modellen berechneten Unterschiede des Anteils der Brache fläche am Gesamtfluss. Generell zeigt sich dabei für beide Modelle, dass hohe relative Flussunterschiede auch mit hohen Differenzen in der Landnutzungs-Zusammensetzung im Einzugsgebiet der Sensoren korrelieren. Allerdings sind die Ergebnisse beein-

trächtigt durch eine starke Streuung, und eine statistische Auswertung wird zudem dadurch erschwert dass der funktionelle Zusammenhang zwischen den betrachteten Differenzen nicht eindeutig ist. Obwohl rein optisch bewertet das LS Modell durch die geringere Streuung bessere Korrelationen mit den gemessenen Differenzen zu zeigen scheint, ist ein verlässlicher Modellvergleich aufgrund dieser Datengrundlage nicht möglich.

#### 4.4 GEMESSENE FLÜSSE GEGEN MODELLIERTE FLÜSSE

Auch der in Abbildung 1b vorgestellte Validierungsansatz für Footprint Modelle, der Vergleich zwischen gemessenen Flüssen an einer Position mit gemischtem Einzugsgebiet und modellierten Flüssen, wurde sowohl mit Eddy Kovarianz Daten als auch mit Scintillometer Messungen durchgeführt. Im folgenden gezeigt (Abbildung 5) werden hier lediglich die Ergebnisse für die Eddy Kovarianz Stationen.

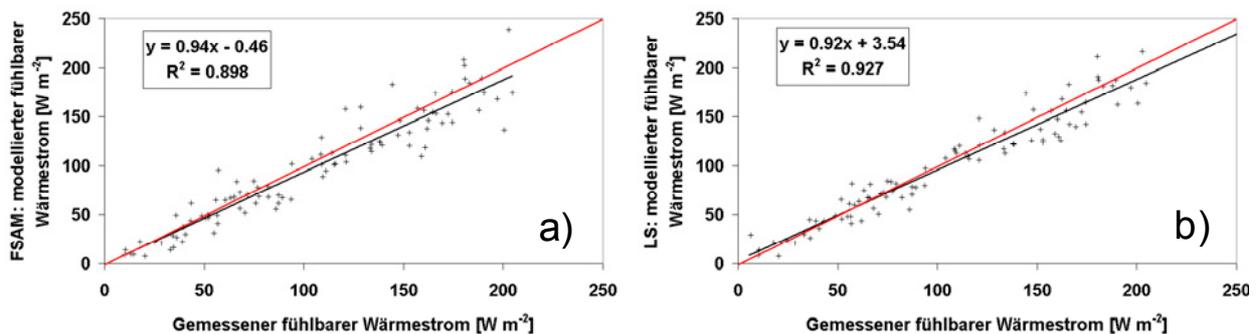


Abbildung 5: Zusammenstellung der Ergebnisse des Vergleichs zwischen gemessenen Flüssen einer Position mit heterogenem Einzugsgebiet und modellierten Flüssen, unter Verwendung von analytischen (a) und LS (b) Footprint Analysen. Hierzu wurden Daten der Eddy Kovarianz Stationen verwendet.

Die in Abbildung 5 gezeigten Ergebnisse sind insofern gut geeignet zur Validierung von Footprint Modellen, als dass sich der Zusammenhang zwischen gemessenen Flüssen und modellierten Flüssen eindeutig durch Anpassung einer linearen Regression bewerten lässt. Die hieraus gewonnenen statistischen Parameter erlauben einen Rückschluss auf den Grad der Übereinstimmung zwischen beiden Messreihen, und ergeben somit ein Qualitätsmaß für das jeweils verwendete Footprint Modell. Für beide in Abbildung 5 dargestellten Datenreihen ergibt sich ein hohes Bestimmtheitsmaß  $r^2$  von etwa 0.9, wobei zu berücksichtigen ist dass auch ohne die Verwendung der Footprint Ergebnisse schon eine hohe Korrelation zwischen den Messungen der Position mit gemischtem Einzugsgebiet und den Referenzen vorliegt, da alle Messreihen von der gleichen kurzweiligen Einstrahlung beeinflusst werden. Das leicht höhere Bestimmtheitsmaß für das LS Modell deutet jedoch darauf hin, dass die Verwendung dieses Modells realistischere Ergebnisse zur Zusammensetzung der Landnutzung im Einzugsgebiet eines Sensors ergibt.

#### 5 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Beide im Verlauf dieser Studie eingesetzte Footprint Modelle erlauben die Berechnung der Zusammensetzung der Landnutzungsklassen im Einzugsgebiet eines Sensors mit zufriedenstellender Genauigkeit. Beim Vergleich von Landnutzungsergebnissen mit gemessenen Flüssen des flühlbaren Wärmestroms ergaben sich jeweils deutliche Zusammenhänge zwischen diesen beiden Größen, welche allerdings nur schwer statistisch auswertbar sind. Eine Korrelationsanalyse zwischen gemessenen und modellierten Flüssen ergab für beide Footprint Ansätze eine hohe Übereinstimmung zwischen den verglichenen Datenreihen, wobei die Ergebnisse für das LS Modell leicht besser waren als jene des analytischen FSAM. Die gezeigten Resultate sind generell beeinträchtigt durch Streuung, welche im Falle der Eddy Kovarianz Stationen vor allem durch den Einsatz von unterschiedlicher Instrumentierung an den einzelnen Positionen hervor gerufen wurde.

Aus Platzgründen wurde hier verzichtet auf die Darstellung der Ergebnisse eines weiteren Datensatzes mit insgesamt sieben simultan betriebenen Eddy Kovarianz Komplexen, bei dem der Impulsfluss als Messgröße für die Footprint Validierung verwendet wurde. Auch im Falle dieses Experiments ergab sich aufgrund der nicht einheitlichen Instrumentierung eine Streuung der Ergebnisse, welche die Unterschiede aufgrund der Charakteristika der Footprint Modelle teilweise überstieg, und so die Qualität des Vergleichs deutlich verschlechterte. Ähnliches gilt auch für den weiter oben erwähnten Vergleich von CO<sub>2</sub>-Flüssen aus Bodenkammer-Messungen mit Ergebnissen eines Eddy Kovarianz Messkomplexes. Zwar konnte die Übereinstimmung der Daten beider Techniken unter Berücksichtigung von Footprint Aspekten grundlegend verbessert werden (Reth et al., 2004), jedoch waren die systemischen Abweichungen deutlich höher als die Differenzen, welche aus den unterschiedlichen Eigenschaften der Footprint Ansätze hervor gerufen wurden.

Generell unterstreichen die gezeigten Ergebnisse das hohe Potential von experimentellen Vergleichsansätzen für Footprint Modelle basierend auf Messungen natürlicher Tracer. Trotz der Beeinträchtigung durch nicht einheitliche Instrumentierung im Falle des vorliegenden Experiments konnten Unterschiede zwischen den beiden eingesetzten Modellen heraus gearbeitet werden, welche als Qualitätsmaß zur Validierung der Ansätze verwendet werden können. Somit stellen Studien mit Messungen natürlicher Tracer eine praktische und vor allem billige Alternative dar zur Durchführung von Experimenten mit künstlichen Tracergasen. Aus den bisher durchgeführten Analysen lassen sich die folgenden Empfehlungen für zukünftige Studien ableiten:

- Ein Vergleich von unterschiedlichen Messsystemen wie zum Beispiel Bodenkammern und Eddy Kovarianz Komplexen ist aufgrund der systemischen Unterschiede ungeeignet zur Validierung von Footprint Ansätzen. Bei der Verwendung von Eddy Kovarianz Stationen sollte eine einheitliche Instrumentierung für alle eingesetzten Komplexe gewählt werden, um eine zusätzliche Streuung der Messungen zu vermeiden. Durch die hohe Korrelation zwischen einzelnen Sensoren des gleichen Typs sind Scintillometer besonders geeignet für derartige Vergleichsstudien.
- Der beste der hier getesteten Vergleichsansätze für Footprint Modelle basierend auf Messungen natürlicher Tracer ist der Vergleich von Messungen an einer Position mit gemischtem Einzugsgebiet mit modellierten Flüssen aus Referenzmessungen und Footprint Ergebnissen (Abbildung 1b).
- Die Landnutzungsstruktur des Vergleichsexperiments sollte aus nur zwei unterschiedlichen Landnutzungsarten zusammen gesetzt sein, welche bei etwa gleicher aerodynamischer Rauigkeit signifikante Unterschiede in den Flüssen von beispielsweise fühlbarer oder latenter Wärme aufweisen. An der Messposition mit gemischtem Einzugsgebiet sollte ein Profilmast mit Instrumenten in unterschiedlichen Höhen installiert werden.

## DANKSAGUNGEN

Die hier vorgestellten Studien wurden im Rahmen des VERTIKO Projekts durchgeführt. VERTIKO (FKZ: 07ATF37) ist ein Teilprojekt des Programms Atmosphärenforschung 2000 (AFO 2000), welches vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert wird.

## LITERATUR

Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, Ü., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A. S., Martin, P. H., Berbigier, P., Bernhofer, C., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grünwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R., und Vesala, T. (2000). Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology, *Advances in Ecological Research*, 30, 113-175.

Baldocchi, D. D. (1997). Flux footprints within and over forest canopies, *Boundary-Layer Meteorol.*, 85, 273-292.

- Baldocchi, D. D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Fuentes, J. D., Goldstein, A., Katul, G., Law, B. E., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, J. W., Oechel, W., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., and Wofsy, S. (2001). FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapour and energy flux densities, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 82, 2415-2435.
- Beyrich, F., Herzog, H. J., and Neisser, J. (2002). The LITFASS project of DWD and the LITFASS-98 experiment: The project strategy and the experimental setup, *Theoretical and Applied Climatology*, 73, 3-18.
- Cooper, D. I., Eichinger, W. E., Archuleta, J., Hipps, L., Kao, J., Leclerc, M. Y., Neale, C. M., and Prueger, J. (2003). Spatial source-area analysis of three-dimensional moisture fields from lidar, eddy covariance, and a footprint model, *Agric. For. Meteorol.*, 114, 213-234.
- Finn, D., Lamb, B., Leclerc, M. Y., and Horst, T. W. (1996). Experimental evaluation of analytical and Lagrangian surface-layer flux footprint models, *Boundary-Layer Meteorol.*, 80, 283-308.
- Flesch, T. K., Wilson, J. D., and Yee, E. (1995). Backward-time Lagrangian stochastic dispersion models and their application to estimate gaseous emissions, *J. Appl. Meteorol.*, 34, 1320-1332.
- Foken, T., and Leclerc, M. Y. (2004). Methods and limitations in validation of footprint models, *Agric. For. Meteorol.*, (accepted).
- Gash, J. H. C. (1986). A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements, *Boundary-Layer Meteorol.*, 35, 409-414.
- Gryning, S.-E., Holtslag, A. A. M., Irwin, J. S., and Sivertsen, B. (1987). Applied dispersion modelling based on meteorological scaling parameters, *Atmos. Environ.*, 21, 79-89.
- Haenel, H. D., and Grünhage, L. (1999). Footprint analysis: A closed analytical solution based on height-dependent profiles of wind speed and eddy viscosity, *Boundary-Layer Meteorol.*, 93, 395-409.
- Horst, T. W., and Weil, J. C. (1992). Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, 59, 279-296.
- Horst, T. W. (1999). The footprint for estimation of atmosphere-surface exchange fluxes by profile techniques, *Boundary-Layer Meteorol.*, 90, 171-188.
- Kljun, N., Rotach, M. W., and Schmid, H. P. (2002). A three-dimensional backward lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications, *Boundary-Layer Meteorol.*, 103, 205-226.
- Kljun, N., Kormann, R., Rotach, M. W., and Meixner, F. X. (2003). Comparison of the Lagrangian footprint model LPDM-B with an analytical footprint model, *Boundary-Layer Meteorol.*, 106, 349-355.
- Leclerc, M. Y., and Thurtell, G. W. (1990). Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis, *Boundary-Layer Meteorol.*, 52, 247-258.
- Leclerc, M. Y., Shen, S., and Lamb, B. (1997). Observations and large-eddy simulation modeling of footprints in the lower convective boundary layer, *J. Geophys. Res. D*, 102, 9323-9334.
- Leclerc, M. Y., Karipot, A., Prabha, T., Allwine, G., Lamb, B., and Gholz, H. L. (2003a). Impact of non-local advection on flux footprints over a tall forest canopy: a tracer flux experiment, *Agric. For. Meteorol.*, 115, 19-30.

- Leclerc, M. Y., Meskhidze, N., und Finn, D. (2003b). Comparison between measured tracer fluxes and footprint model predictions over a homogeneous canopy of intermediate roughness, *Agric. For. Meteorol.*, 117, 145-158.
- Pasquill, F. (1972). Some aspects of boundary layer description, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 98, 469-494.
- Rannik, Ü., Aubinet, M., Kurbanmuradov, O., Sabelfeld, K. K., Markkanen, T., und Vesala, T. (2000). Footprint analysis for measurements over a heterogeneous forest, *Boundary-Layer Meteorol.*, 97, 137-166.
- Rannik, Ü., Markkanen, T., Raittila, J., Hari, P., und Vesala, T. (2003). Turbulence statistics inside and over forest: Influence on footprint prediction, *Boundary-Layer Meteorol.*, 109, 163-189.
- Reth, S., Göckede, M., und Falge, E. (2004). CO<sub>2</sub> efflux from agricultural soils in Eastern Germany - comparison of a closed chamber system with eddy covariance measurements, *Theor. Appl. Climatol.*, (accepted).
- Reynolds, A. M. (1998). A two-dimensional Lagrangian stochastic dispersion model for convective boundary layers with wind shear, *Boundary-Layer Meteorol.*, 86, 345-352.
- Schmid, H. P., und Oke, T. R. (1988). Estimating the source area of a turbulent flux measurement over a patchy surface, in *8th Symposium on Turbulents and Diffusion*, Boston, MA, American Meteorological Society, 123-126.
- Schmid, H. P., und Oke, T. R. (1990). A model to estimate the source area contributing to turbulent exchange in the surface layer over patchy terrain, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 116, 965-988.
- Schmid, H. P. (1994). Source areas for scalars and scalar fluxes, *Boundary-Layer Meteorol.*, 67, 293-318.
- Schmid, H. P. (1997). Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes, *Agric. For. Meteorol.*, 87, 179-200.
- Schmid, H. P. (2002). Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective, *Agric. For. Meteorol.*, 113, 159-183.
- Schuepp, P. H., Leclerc, M. Y., MacPherson, J. I., und Desjardins, R. L. (1990). Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation, *Boundary-Layer Meteorol.*, 50, 355-373.
- Thomson, D. J. (1987). Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows, *J. Fluid Mech.*, 180, 529-556.
- Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A. J., Schulze, E.-D., Rebmann, C., Moors, E. J., Granier, A., Gross, P., Jensen, N. O., Pilegaard, K., Lindroth, A., Grelle, A., Bernhofer, C., Grünwald, T., Aubinet, M., Ceulemans, R., Kowalski, A. S., Vesala, T., Rannik, Ü., Berbigier, P., Loustau, D., Guomundsson, J., Thorgeirsson, H., Ibrom, A., Morgenstern, K., Clement, R., Moncrieff, J., Montagnani, L., Minerbi, S., und Jarvis, P. G. (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests, *Nature*, 404, 861-865.