

Stadtklima im Wandel [UC]2

Abschlussbericht



Stadtklima im Wandel [UC]2:

Teilprojekt 6: 3D-Strahlung und nicht-gebäudeauflösende
Simulationstechniken

Förderkennzeichen

01LP1911F

Zuwendungsempfänger

Universität München

Projektverantwortliche

Bernhard Mayer

Projektlaufzeit

1. September 2019 – 31. August 2022

München, 29. März 2023



FONA
Forschung für Nachhaltige
Entwicklung
BMBF

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

A Aufgabenstellung

Ziel der Fördermaßnahme ist das in der 1. Phase entwickelte Stadtklimamodell PALM-4U zu einem Produkt weiterzuentwickeln, das praxistauglich für den Einsatz in Kommunen und anderen Anwendern ist, aber auch für wissenschaftliche Forschung eingesetzt werden kann.

Unser Teilprojekt TP6 arbeitete mit TP5 (FKZ: 01LP1911E) an einem neuen Strahlungstransfermodell. Speziell die Auswirkung von variablen Spurengasen wie Wasserdampf oder Wolken und Nebel können mit dem vorhandenen Strahlungstransport Modul (RTM) nicht berücksichtigt werden. Um bessere Erwärmungs- und Kühlungsraten in der Urbanen Grenzschicht zu erhalten wird das dreidimensionale Strahlungstransfermodell TenStream an PALM-4U angebunden und um ein Gebäudemodell erweiter.

Konkret lautete unser Arbeitspaket:

- WP-P2.1 18 PM : Implementierung von Gebäuden in das 3D-Strahlungstransfermodell TenStream, Validierung dessen gegen das präzise MonteCarlo Modell MYSTIC und die Kopplung an das PALM-4U Modell.

B Voraussetzungen

Eine Voraussetzung für die Durchführbarkeit des Teilprojekts war die technische Expertise in der Entwicklung des parallelisierten Strahlungstransportlösers TenStream und Erfahrung in der Simulation von Strahlungstransport in der Atmosphäre und in komplexem Terrain.

Der Lehrstuhl für Experimentelle Meteorologie der LMU verfügt über langjährige Erfahrung im Bereich der dreidimensionalen Strahlungstransportmodellierung und in der Entwicklung von Approximationen für Large Eddy Simulationsmodelle und deren Anwendung.

Der Strahlungstransportlöser `TenStream` wurde in den letzten 10 Jahren in unserer Gruppe entwickelt.

C Planung und Ablauf

Alle Aktivitäten wurden an der LMU München von Fabian Jakub durchgeführt und von Prof. Bernhard Mayer begleitet. Der Ablauf während der Einzeljahre:

2019:

- Es wurden jedoch bereits im Vorfeld Gespräche mit Projektpartnern bezüglich der Oberflächendaten in PALM besprochen, technische Unterstützung erbracht um das TenStream Modell zu installieren und es wurde begonnen irreguläre Bodengitter in das Benchmark Modell MYSTIC zu implementieren.

2020:

- Das Benchmark Modell MYSTIC wurde erweitert um Strahlungstransport für beliebige irreguläre Bodengitter zu berechnen.
- Sensitivitätsstudien zum benötigten Detailgrad der Eingangsdaten und Konzeption einer Implementation von Gebäuden in das TenStream Modell.

2021:

- Implementation eines Gebäudemodells in TenStream
- Erweiterung der TenStream Software Bibliothek um einen Raytracer um direkt in PALM Monte-Carlo Benchmark Rechnungen zu ermöglichen.
- Unterstützung TP5 (FKZ: 01LP1911E) bei der Kopplung des TenStream Moduls an PALM.
- Durchführung von Vergleichsstudien mit verschiedenen Strahlungstransportlösern im PALM Modell. (vorhandene und neue)

2022:

- Konsolidierung der TenStream Implementierung in PALM inklusive Dokumentation und automatischer Installations- und Testroutinen.
- Durchführung von Vergleichsstudien verschiedener (vorhandener und neuer) Strahlungstransportlösern im PALM Modell in Vorbereitung für die Publikation der Ergebnisse durch Kollegen aus TP5 (FKZ: 01LP1911E).

D Ergebnisse

Der Effekt von 3D Strahlung in der urbanen Grenzschicht:

Um 3D Strahlungstransport Benchmarkrechnungen mit hoch aufgelöster urbaner Bebauung anfertigen zu können, wurde zunächst das Monte-Carlo Strahlungstransportmodell MYSTIC [3;4] erweitert um Dreiecksgitter berücksichtigen zu können (MS 2, DL 3). Damit lassen sich nun Strahlungsflüsse und Erwärmungsraten in beliebig komplexen Straßenschluchten physikalisch korrekt berechnen. In diesem Zusammenhang wurden erste Abschätzungen angestellt um den benötigten Detailgrad von Eingabedaten wie spektrale Albedo oder Reflexionsverteilungsfunktion und weiterhin die Anforderungen an das Strahlungstransportmodell in PALM zu bestimmen. Ziel dabei ist es Leitlinien für die Gebäudeerweiterung des 3D Strahlungstransportmodells TenStream [1;2] zu entwickeln (DL 1, DL 4). Eine konkrete Fragestellung ist es, ob die Gebäude die in den TenStream implementiert werden sollen, wie auch in PALM, nur achsenfluchtig möglich sein dürfen oder ob beliebig komplexe Oberflächenformen unterhalb der Gitterauflösung repräsentiert werden sollten.

Abbildung 1 visualisiert einen Experimentaufbau um die Sensitivität der Absorption in der Bebauungsschicht in Abhängigkeit der Seitenwände zu bestimmen. Untersucht wurde dabei der Unterschied zwischen einer fachen, diagonalen Straßenschlucht und dem Fall, dass Gebäude entlang dem Gitter angepasst wurden was in sog. Zick-Zack-Wänden resultiert.

Die angestellten Experimente haben zur Entscheidung geführt keine Oberflächeneffekte unterhalb der Gitterauflösung in den TenStream zu implementieren und nur achsenfluchtige Gebäude zu erlauben. Dies ermöglichte den Beginn der Implementierung von Gebäuden in das TenStream Strahlungstransportmodell (DL 1).

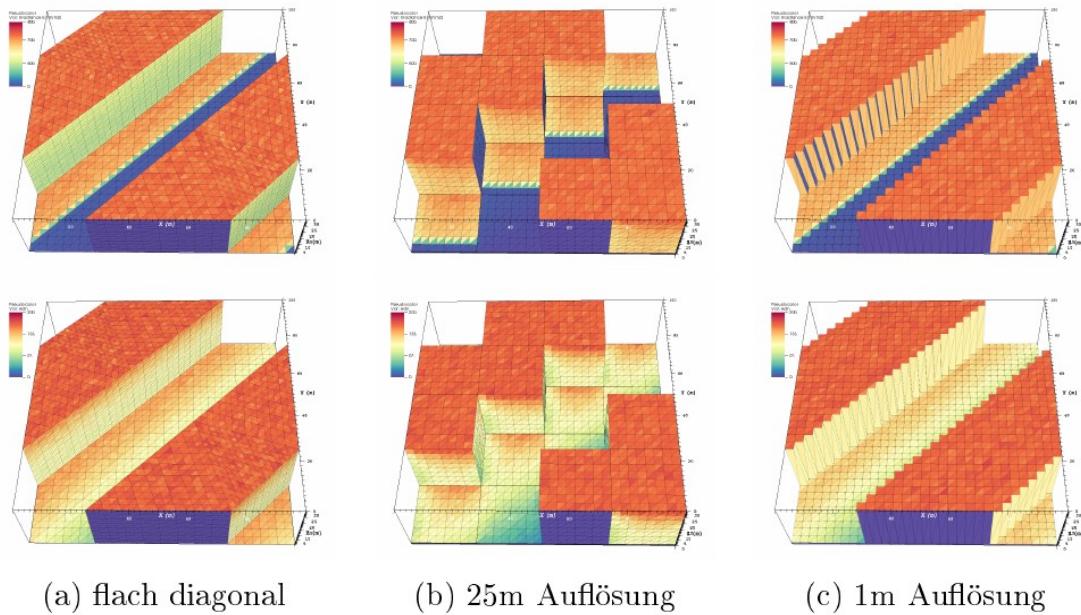


Abbildung 1: Verteilung von direkter(oben) und diffuser(unten) Strahlung in einer sich zyklisch wiederholenden Straßenschlucht. Die Sonne scheint unter einem Zenit Winkel von 45° aus Süden. Links mit einer glatten Fassade und in der Mitte bzw. rechts (mit variierender horizontaler Auflösung) mit einer Zick-Zack-Oberfläche wie sie im Moment im PALM-Modell zu finden ist.

Die Weiterentwicklung des Strahlungstransportl  ers TenStream und Validierung in PALM:

das TenStream Modell dahingehend erweitert dass Gebäude und 3D Vegetation berücksichtigt werden können (DL 1). Weiterhin wurde ein Monte-Carlo Löser (RayLi) in den TenStream eingebunden um direkt Ergebnisse aus PALM Simulationsläufen direkt vergleichen zu können. Wir unterstützten die Kollegen Sebastian Schubert und Mohamed Salim der HUB (TP5, FKZ: 01LP1911E) bei der Koppelung der Gebäude und Vegetation aus PALM mit dem TenStream Strahlungstransport Modell (DL 4, MS 3). Dies erlaubte nun den Vergleich der verschiedenen in PALM verfügbaren Strahlungstransportmethoden und eine Abschätzung wie sich die Anzahl der streams auf die Ergebnisse auswirken (DL 3). Abbildung 2 visualisiert einen Experimentaufbau eines kleinen Modellgebiets mit Gebäudedaten aus Berlin.

Untersucht wurden Fehler in der Verteilung von Bestrahlungsstärken auf den Oberflächen sowie Fehler bezüglich atmosphärischer Heizraten. Als Resultat der Vergleichsstudie empfehlen wir vor allem dann die Nutzung des TenStream Algorithmus wenn korrekte atmosphärische Erwärmungsraten simuliert werden sollen (siehe Abb. 3). Der Standard Löser mit 3 streams für die Solare Direktstrahlung und 10 streams für die Diffusstrahlung wird meist eine ausreichende Genauigkeit für normale LES Anwendungen haben (siehe Tabelle 1).

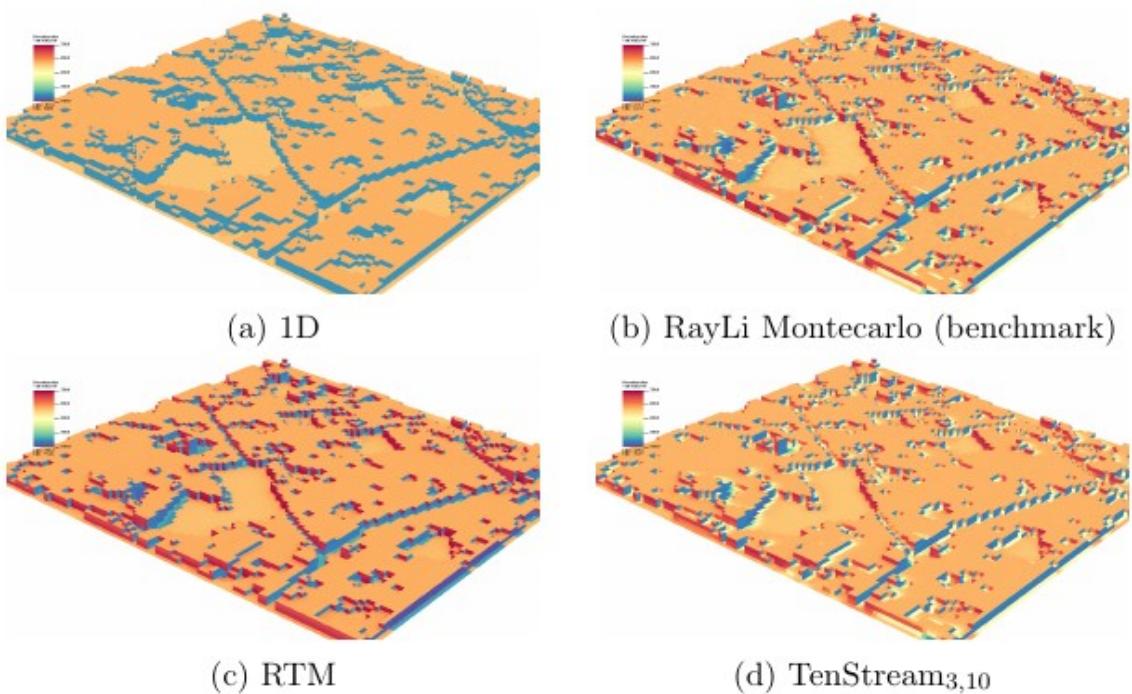


Abbildung 2: Verteilung von Netto (solar und thermisch) Bestrahlungsstärken auf den Bodenflächen für eine Szene aus Berlin. Horizontale und vertikale Gitterweite beträgt 10m. Die Sonne scheint unter einem Zenit Winkel von ca. 45° . Gezeigt sind jeweils die Strahlungsflüsse für den ersten Zeitschritt mit verschiedenen Strahlungstransport Lösern. a) ein 1D Strahlungstransport Schema wie es in prinzipiell allen heutigen Modellen verwendet wird. b) ein mit RayLi (Monte-Carlo Methodik, also sehr rechen-zeitaufwendig aber sehr präzise) berechneter Benchmark. c) das operationell eingesetzte Strahlungstransport Schema RTM in PALM welches 3D Effekte auf den Oberflächen berücksichtigt. d) die neue Implementierung des TenStream Läser in PALM. Quantitative Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt.

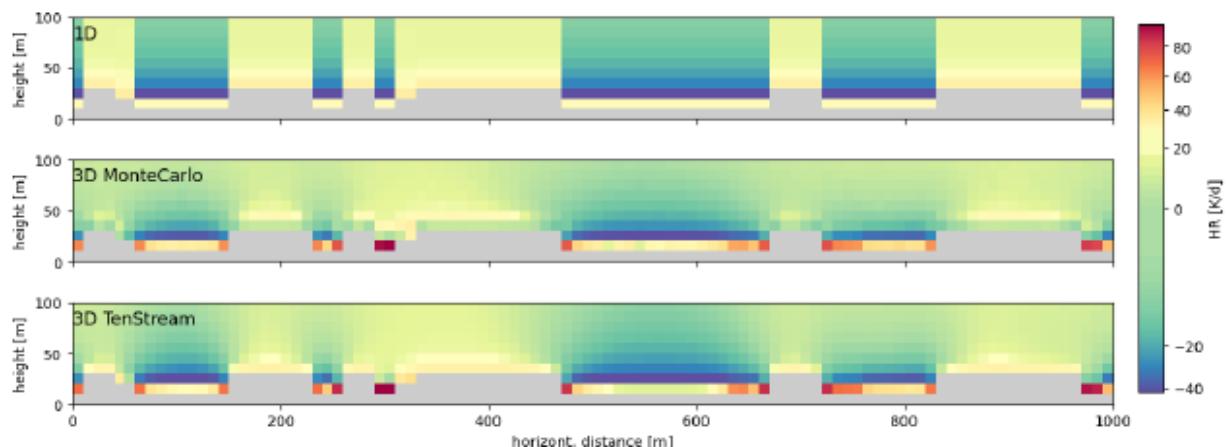


Abbildung 3: Vertikaler Querschnitt von (solarer und thermischer) atmosphärischer Erwärmungsraten. Im Vergleich eine 1D Rechnung (oben), RayLi Monte-Carlo Benchmark (Mitte) und eine Rechnung mit dem neu implementierten TenStream Löser.

Die Verstetigung der Strahlungstransportlösers TenStream in PALM:

Das TenStream Modell wurde in die offizielle Version von PALM-4U übernommen und steht allen Nutzern durch die OpenSource Lizenz GPL frei zur Verfügung. Ein automatisierter Installationsprozess und Dokumentation sind vorhanden. Zukünftige Weiterentwicklungen der TenStream Bibliothek in Hinblick auf Genauigkeit und Effizienz kommt Nutzern von PALM-4U zu Gute.

E Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zusammenarbeit bestand insbesondere mit TP5 (FKZ: 01LP1911E) bei folgenden Punkten:

- Kompilierung von TenStream und seinen benötigten Bibliotheken auf den benutzten Systemen (Cirrus an der HUB und HLRN).
- Kopplung von TenStream mit PALM für komplexe Landoberflächen und Vegetation (MS 3).
- Dokumentation bzgl. der Nutzung des TenStream Lösers.

F Geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projekts werden unter Führung von TP5 (FKZ: 01LP1911E) veröffentlicht. Unsere Beiträge liegen bereits vor.

Literatur

- Jakub, Fabian, and Bernhard Mayer. "A Three-Dimensional Parallel Radiative Transfer Model for use in Cloud Resolving Models – the TenStream solver." JQSRT (2016 a).
- Jakub, Fabian, and Bernhard Mayer. "3D Radiative Transfer in Large-Eddy Simulations – Experiences coupling the TenStream solver to the „UCLA–LES“ GMD (2016 b)
- Klinger, C. and Mayer, B.: "The Neighbouring Column Approximation (NCA) – A fast Approach for the Calculation of 3D Thermal Heating Rates in Cloud Resolving Models" JQSRT (2016)
- Jakub, F. and Mayer, B.: The role of 1-D and 3-D radiative heating in the organization of shallow cumulus convection and the formation of cloud streets, Atmos. Chem. Phys., 17, 13317-13327, <https://doi.org/10.5194/acp-17-13317-2017>, 2017.
- Klinger, C., Mayer, B., Jakub, F., Zinner, T., Park, S.-B., and Gentine, P.: Effects of 3-D thermal radiation on the development of a shallow cumulus cloud field, Atmos. Chem. Phys., 17, 5477-5500, <http://dx.doi.org/10.5194/acp-17-5477-2017>, 2017.
- Klinger, C., Feingold, G., and Yamaguchi, T.: Cloud Droplet Growth in Shallow Cumulus Clouds Considering 1D and 3D Thermal Radiative Effects, Atmos. Chem. Phys., 19, 6295-6313, <https://doi.org/10.5194/acp-19-6295-2019>, 2019.
- Klinger, C. and Mayer, B: Neighboring Column Approximation - An Improved 3D Thermal Radiative Transfer Approximation for Non-Rectangular Grids, JAMES, 2019.
- Schäfer, S. A. K., R. J. Hogan, C. Klinger, J. C. Chiu, and B. Mayer (2016), Representing 3D cloud-radiation effects in two-stream schemes: 1. Longwave considerations and effective cloud edge length, J. Geophys. Res. Atmospheres, 121.
- Schäfer, S.A., Klinger, C., et al., 2019, Uncertainties in longwave radiative transfer modelling and evaluation of ecRad model

- Stevens et al., 2019, Large-eddy and Storm Resolving Models for Climate Prediction – The Added Value for Clouds and Precipitation, Journal of the Meteorological Society of Japan.
- Veerman M., Pedruzo-Bagazgoitia X., Jakub F., Vilà-Guerau de Arellano J., Heerwaarden C., 2019, 3D radiative effects by shallow cumulus clouds on dynamic heterogeneities over a vegetated surface, JAMES, 2019.

		RMSE	rel.RMSE	bias	rel.bias
1D	E_{solar}	265.22 [Wm^{-2}]	67.2%	155.57 [Wm^{-2}]	39.43%
	$E_{thermal}$	43.83 [Wm^{-2}]	-55.2%	-34.25 [Wm^{-2}]	43.10%
	$E_{net,surface}$	239.80 [Wm^{-2}]	76.1%	121.31 [Wm^{-2}]	38.50%
	$H_{atm,solar}$	0.42 [Kd^{-1}]	130.5%	0.42 [Kd^{-1}]	128.85%
	$H_{atm,thermal}$	12.58 [Kd^{-1}]	-1026.2%	-3.39 [Kd^{-1}]	276.54%
RTM	E_{solar}	105.47 [Wm^{-2}]	26.7%	4.25 [Wm^{-2}]	1.08%
	$E_{thermal}$	25.80 [Wm^{-2}]	-32.5%	-7.20 [Wm^{-2}]	9.06%
	$E_{net,surface}$	96.34 [Wm^{-2}]	30.6%	-2.95 [Wm^{-2}]	-0.94%
	$H_{atm,solar}$	0.40 [Kd^{-1}]	122.6%	0.40 [Kd^{-1}]	122.34%
	$H_{atm,thermal}$	5.05 [Kd^{-1}]	-411.9%	-0.70 [Kd^{-1}]	57.02%
TenStream	E_{solar}	24.14 [Wm^{-2}]	6.1%	-0.67 [Wm^{-2}]	-0.17%
	E_{direct}	5.72 [Wm^{-2}]	-7.2%	-1.29 [Wm^{-2}]	1.63%
	$E_{diffuse}$	25.67 [Wm^{-2}]	8.1%	-1.97 [Wm^{-2}]	-0.62%
	(default)	0.00 [Kd^{-1}]	2.7%	0.02 [Kd^{-1}]	0.85%
	$H_{atm,thermal}$	1.56 [Kd^{-1}]	-127.5%	-0.17 [Kd^{-1}]	13.66%
TenStream	E_{solar}	16.09 [Wm^{-2}]	4.1%	-0.22 [Wm^{-2}]	-0.06%
	E_{direct}	6.56 [Wm^{-2}]	-8.3%	-1.92 [Wm^{-2}]	2.42%
	$E_{diffuse}$	18.19 [Wm^{-2}]	5.8%	-2.14 [Wm^{-2}]	-0.68%
	$H_{atm,solar}$	0.00 [Kd^{-1}]	2.5%	0.00 [Kd^{-1}]	1.00%
	$H_{atm,thermal}$	1.49 [Kd^{-1}]	-122.1%	-0.12 [Kd^{-1}]	9.96%
RayLi MC (benchmark)	E_{solar}	6.50 [Wm^{-2}]	1.6%	0.00 [Wm^{-2}]	0.00%
	$E_{thermal}$	1.45 [Wm^{-2}]	-1.8%	0.01 [Wm^{-2}]	-0.01%
	$E_{net,surface}$	6.65 [Wm^{-2}]	2.1%	0.01 [Wm^{-2}]	0.00%
	$H_{atm,solar}$	0.00 [Kd^{-1}]	2.0%	0.00 [Kd^{-1}]	0.00%
	$H_{atm,thermal}$	0.31 [Kd^{-1}]	-25.5%	0.00 [Kd^{-1}]	0.01%

Tabelle 1: Vergleich von Strahlungstransport Ergebnissen anhand des Berlin Test Falls. Die Variablen beziehen sich auf Netto Strahlungsflüsse E an den Boden- bzw. Gebäude- Oberflächen im solaren wie thermischen Spektralbereich sowie auf atmosphärische Ewärmungsraten H in den Bodennahen Schichten. Die Ergebnisse der verschiedenen Strahlungstransportmethoden wurde jeweils gegen das MonteCarlo (RayLi) Benchmark Ergebnis verglichen wobei der Fehler zwischen zwei RayLi Rechnungen ebenfalls angegeben ist um das Monte-Carlo-Rauschen der Simulationen abzuschätzen.