

PALM-4U: Ein neues Stadtklimamodell zur Anwendung auf Hochleistungsrechnern: Modellüberblick und Leistungsfähigkeit

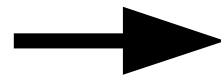
Björn Maronga¹ und das MOSAIK Konsortium:
S Raasch¹, G Groß¹, F Kanani-Sühring¹, M Sühring¹, S Banzhaf², M Belda¹⁴, B Büter³, T Esch⁴, R Forkel⁵, D Fröhlich⁶, T Gronemeier¹, W Heldens⁴, A Hellsten¹¹, T Lang⁷, E Kadasch⁶, B Khan⁵, K Ketelsen¹², P KrČ¹³, H Maamari⁹, A Matzarakis⁶, M Mauder⁵, G Meusel¹, M Pallasch⁹, D Pavlik³, J Pfafferott⁷, J Resler¹³, E Russo², MH Salim¹⁰, M Schaap², C Schneider¹⁰, M Schrempf¹, S Schubert¹⁰, G Seckmeyer¹, H Sieker⁹, RH von Tils¹, S Ward¹, K Winderlich⁶ und J Zeidler⁴

¹ Leibniz Universität Hannover | ² Freie Universität Berlin | ³ GEO-NET Umweltconsulting GmbH |
⁴ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt | ⁵ Karlsruher Institut für Technologie | ⁶ Deutscher Wetterdienst | ⁷ Hochschule Offenburg |
⁹ Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH | ¹⁰ Humboldt-Universität zu Berlin | ¹¹ Finnish Meteorological Institute | ¹² Software Consultant | ¹³ Czech Academy of Sciences, Czech Republic | ¹⁴ Charles University, Prague, Czech Republic

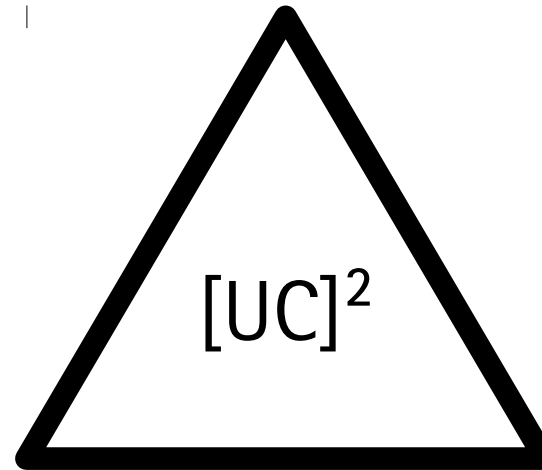
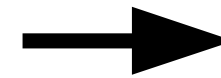


Einleitung: [UC]² – MOSAIK – PALM – PALM-4U

- BMBF Fördermaßnahmen Stadtklima im Wandel [UC]², 2016-2019
- Ziel: Entwicklung eines neuen gebäudeauflösenden Stadtklimamodells für Wissenschaft und Praxis



Modul A
Modellentwicklung
MOSAIK

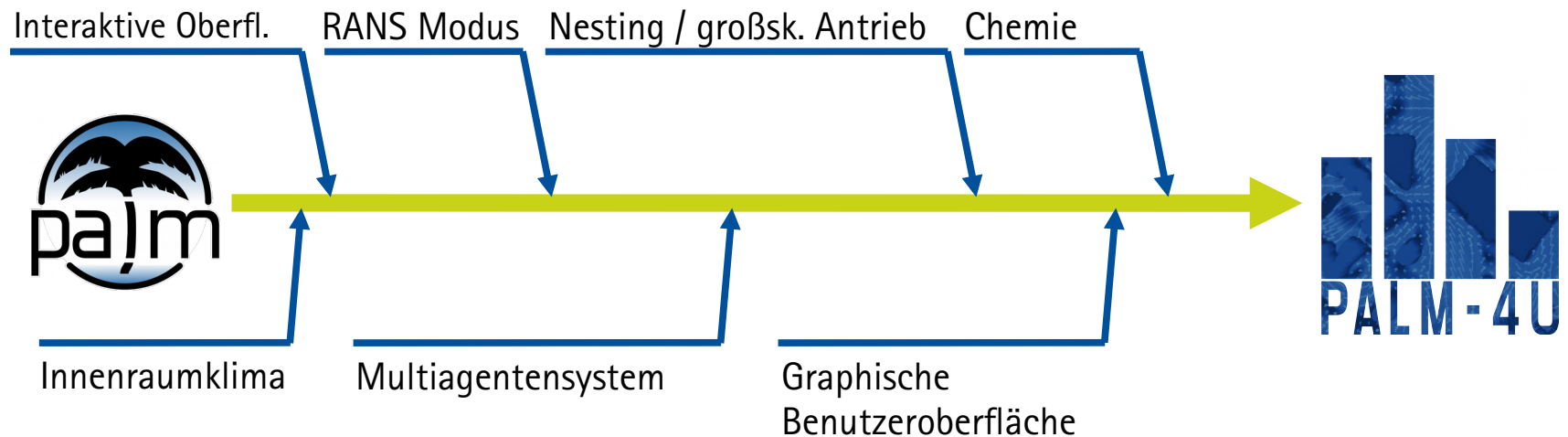


Modul B
Observationen & Windkanal
3DO

Modul C
Praxistauglichkeit/Nutzerfreundlichkeit
UseUClim/KliMoPrax

Einleitung: [UC]² – MOSAIK – PALM – PALM-4U

- PALM: Modellkern (*Maronga et al. 2015, GMD*)
 - Parallelisiertes Large Eddy Simulationsmodell (LES-Modell)
 - Inkompressibel oder anelastisch
 - Kartesisches Gitter
 - Hoch-optimiert und skalierbar
 - Diverse eingebettete Modelle
- PALM-4U: PALM + zusätzliche Komponenten



Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

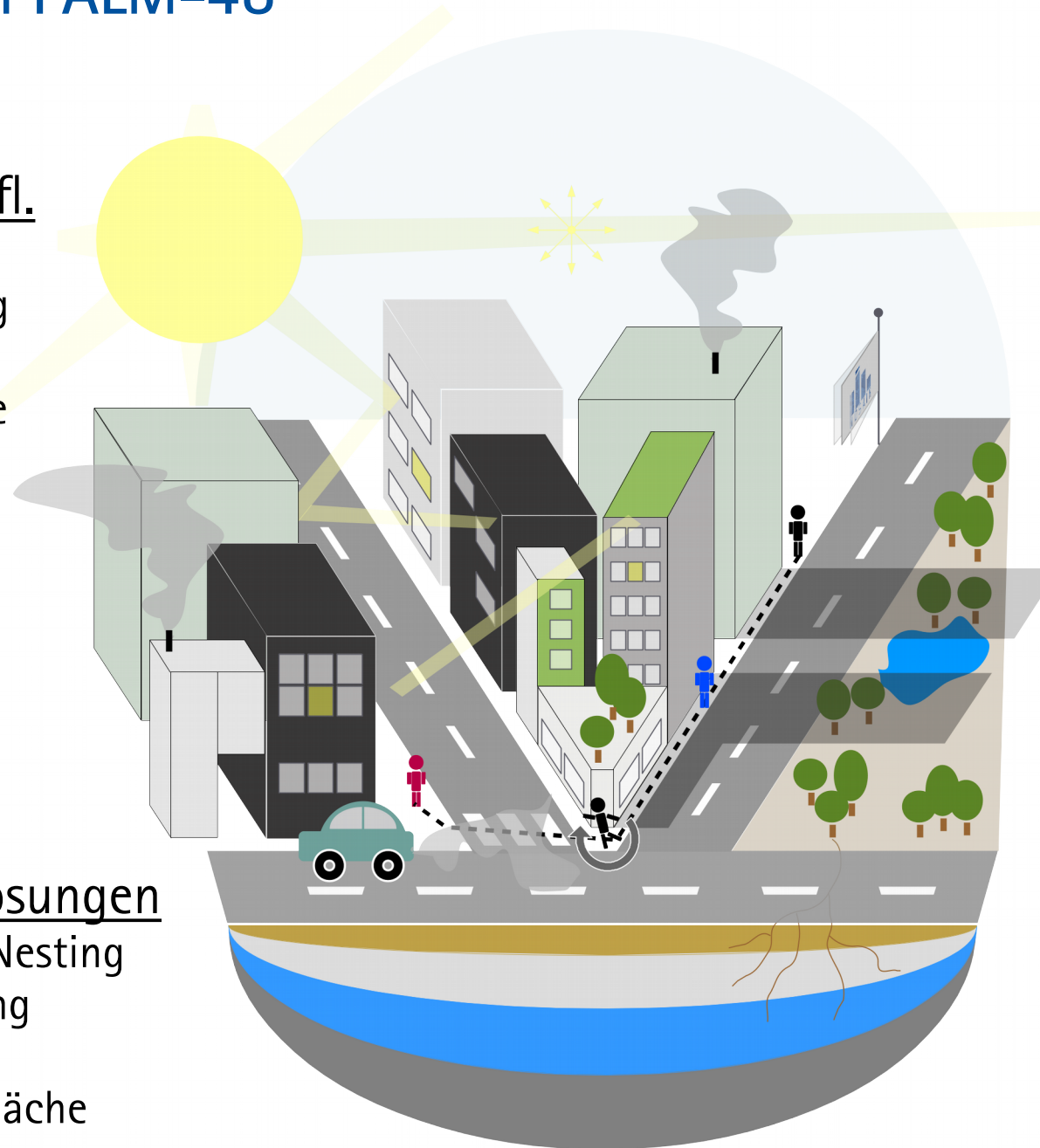
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

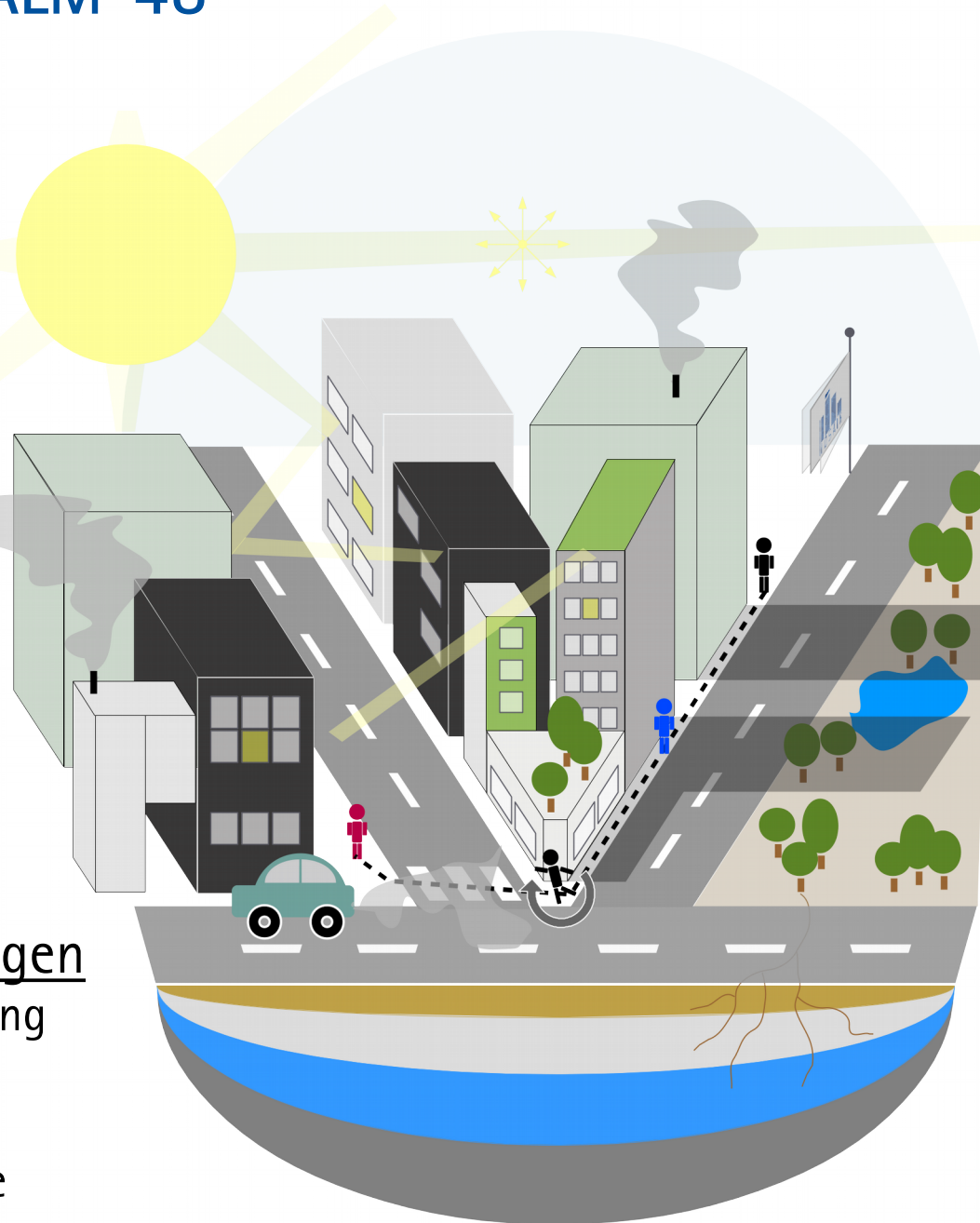
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

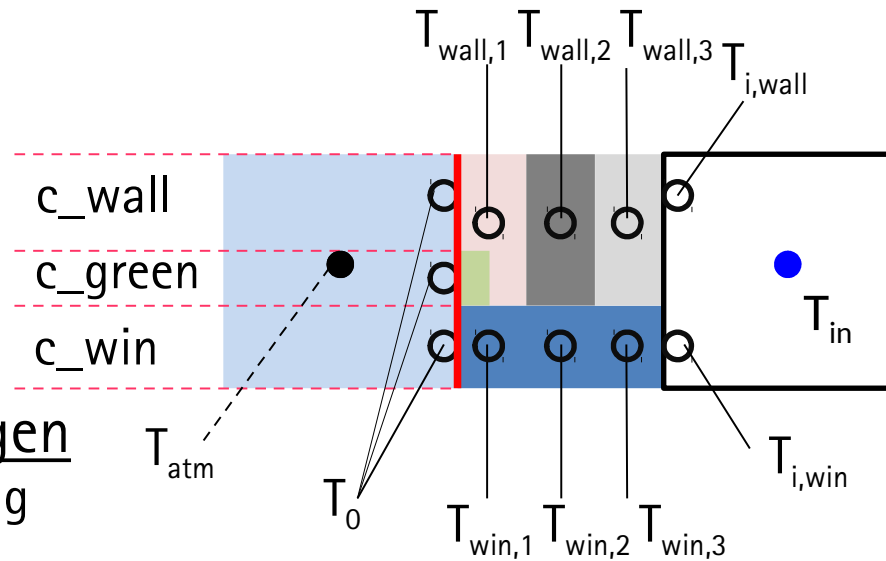
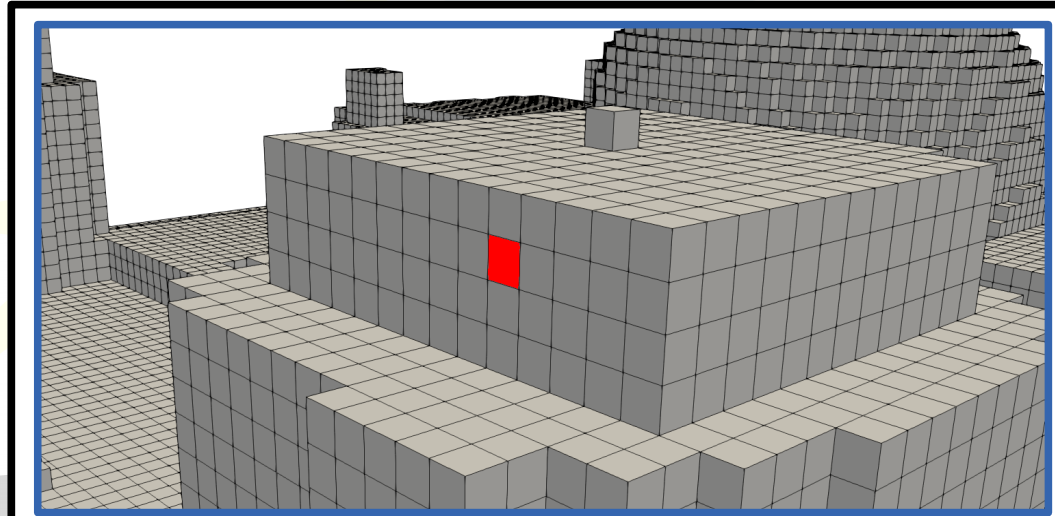
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Resler et al., 2017, GMD

Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

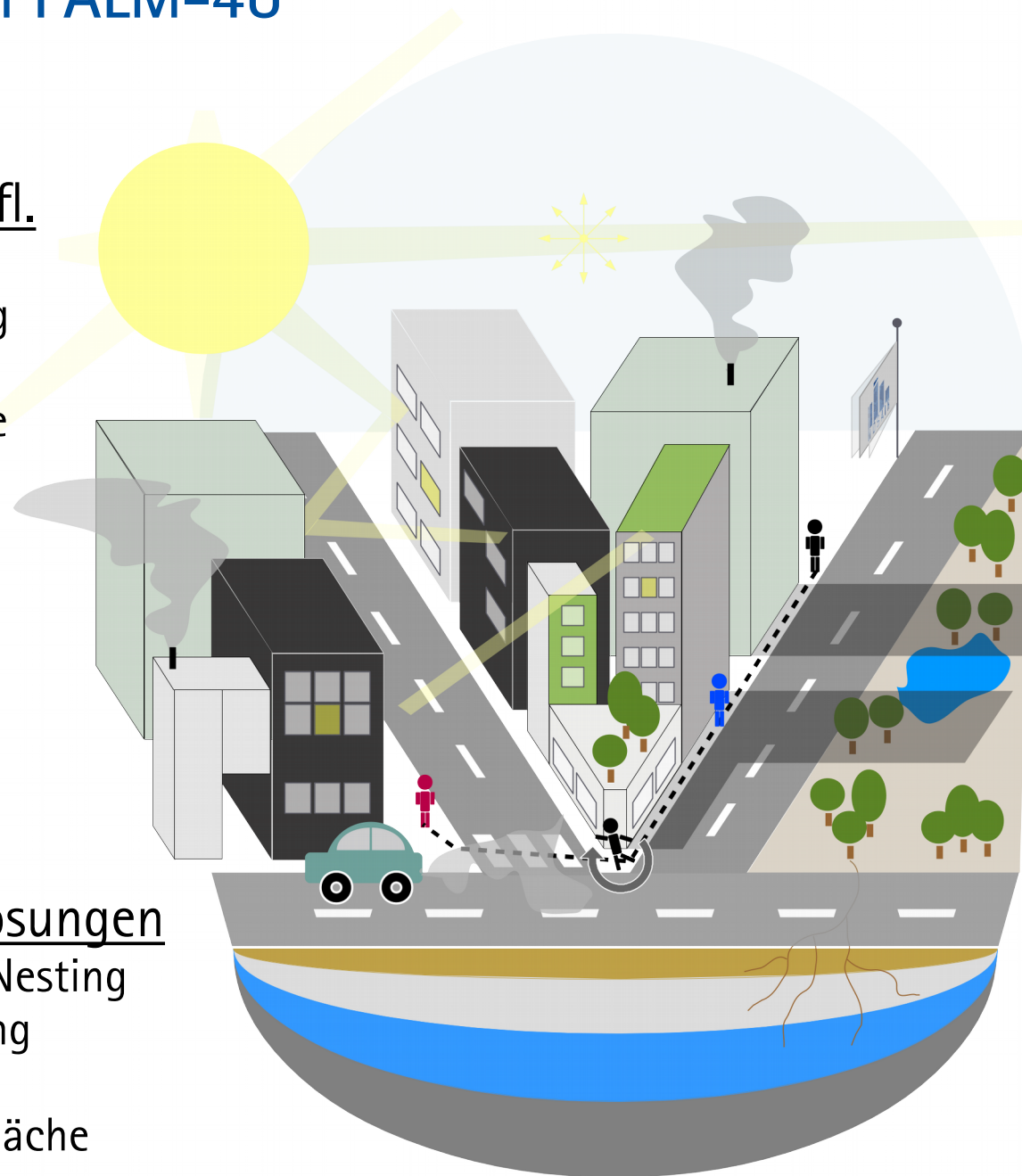
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

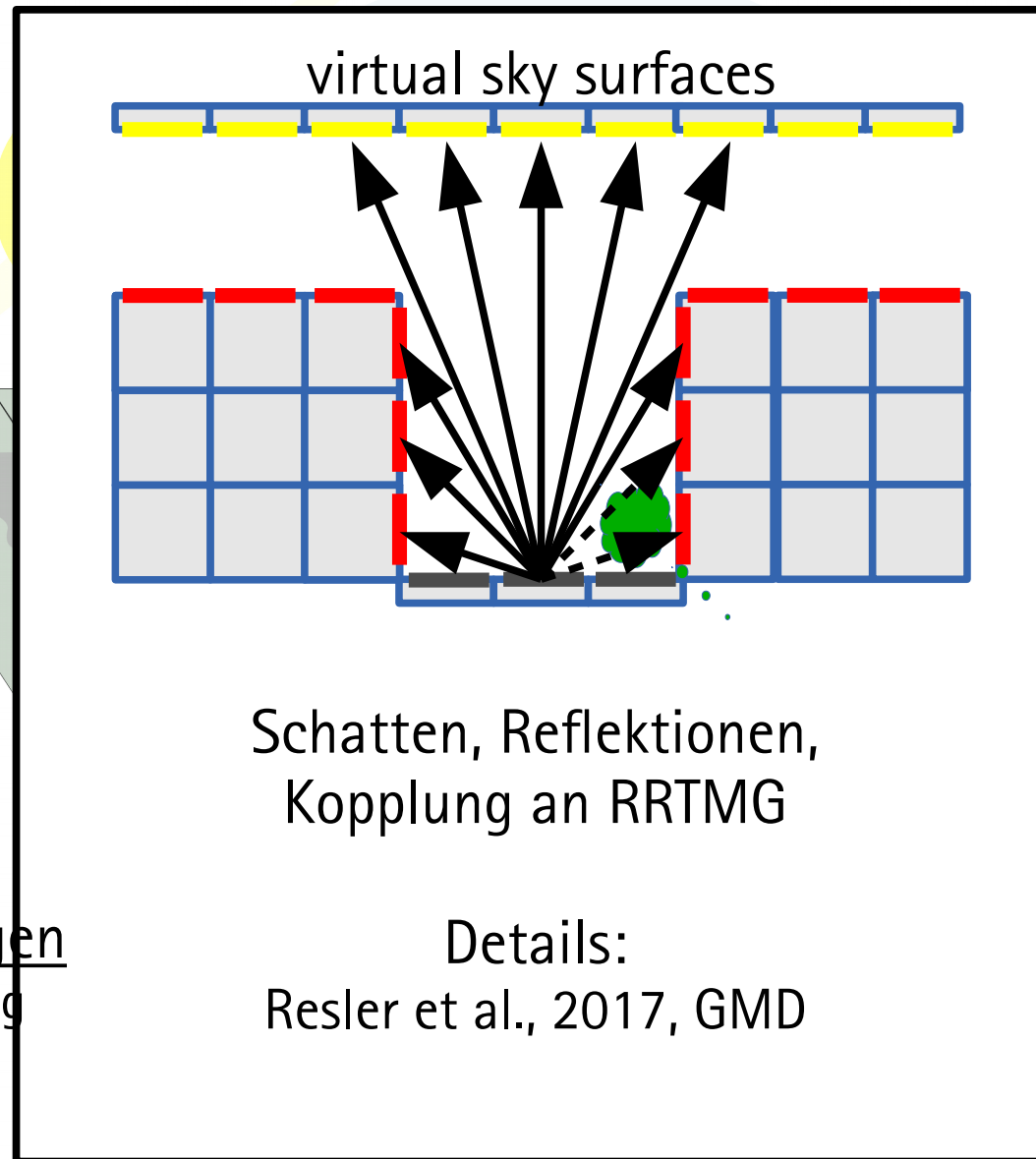
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

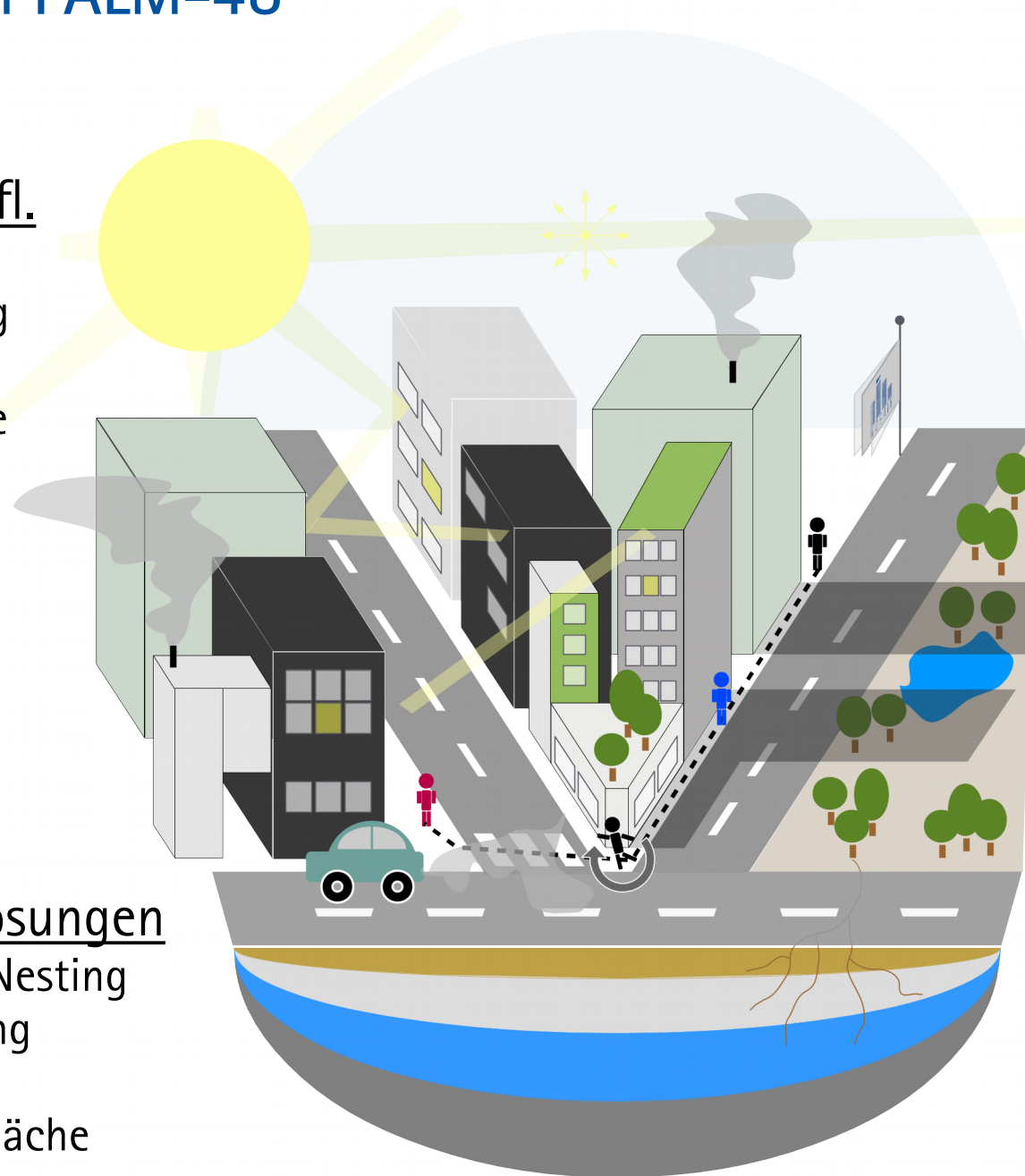
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

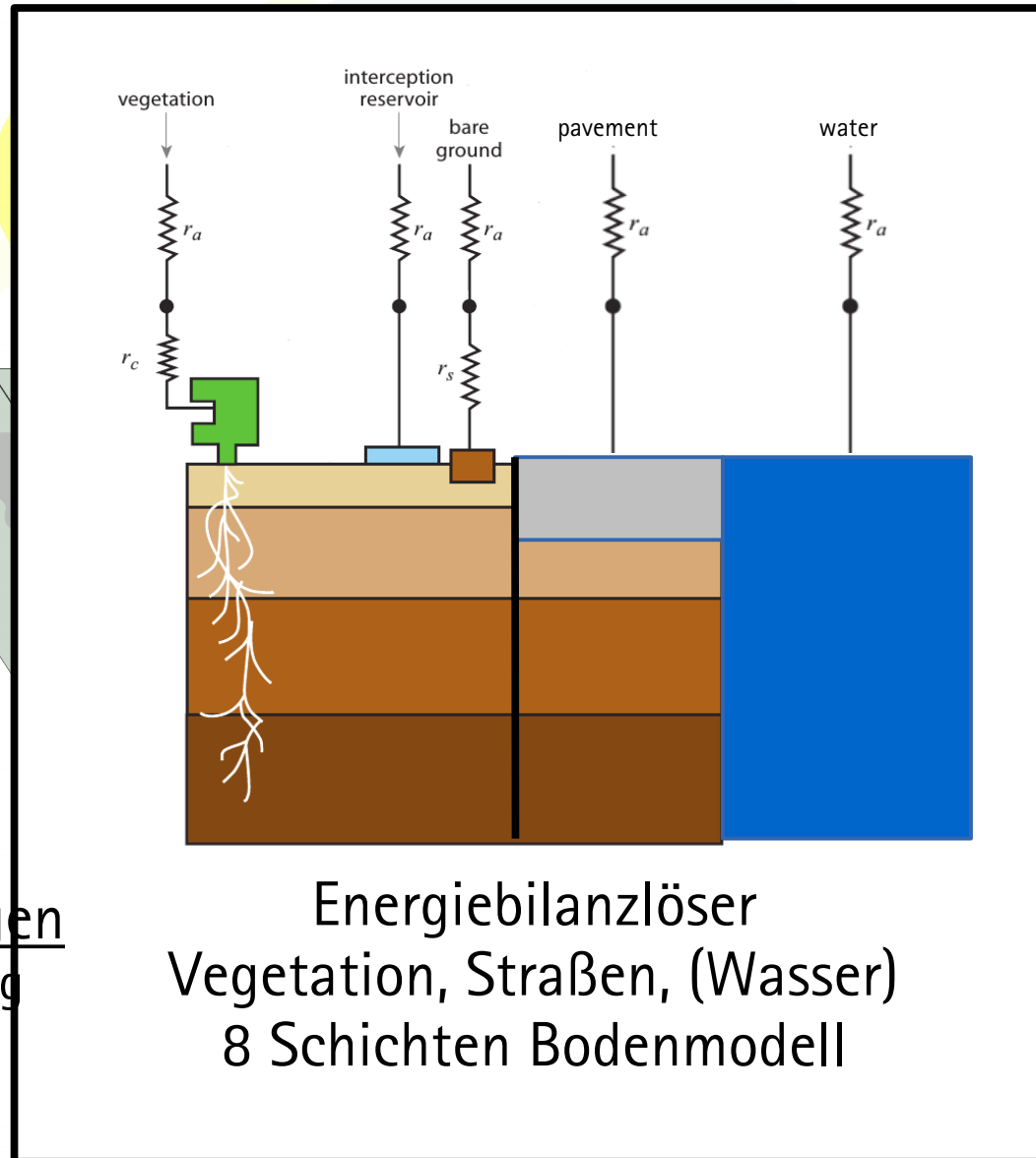
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

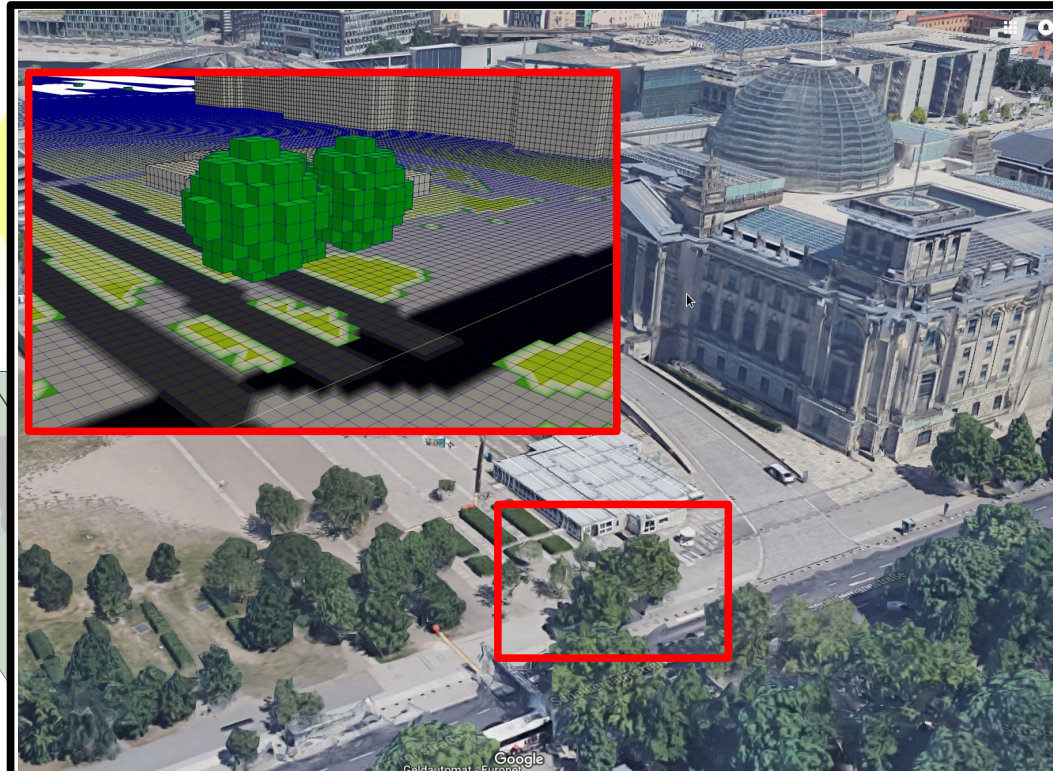
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



3D Blattflächendichte
 Schattenwurf
 Impulssenke
 Wärmequelle
 Wasserdampfquelle

Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

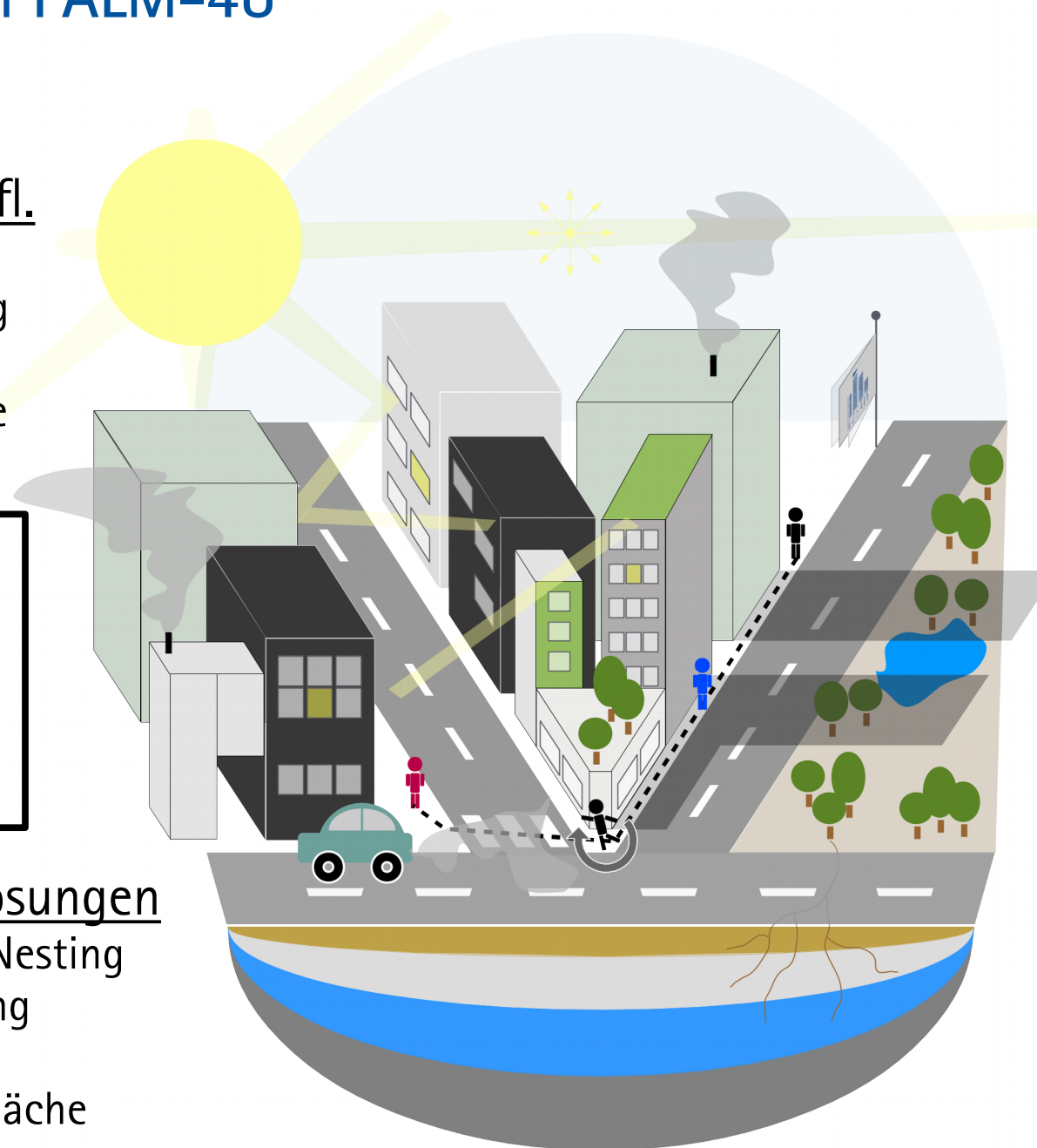
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

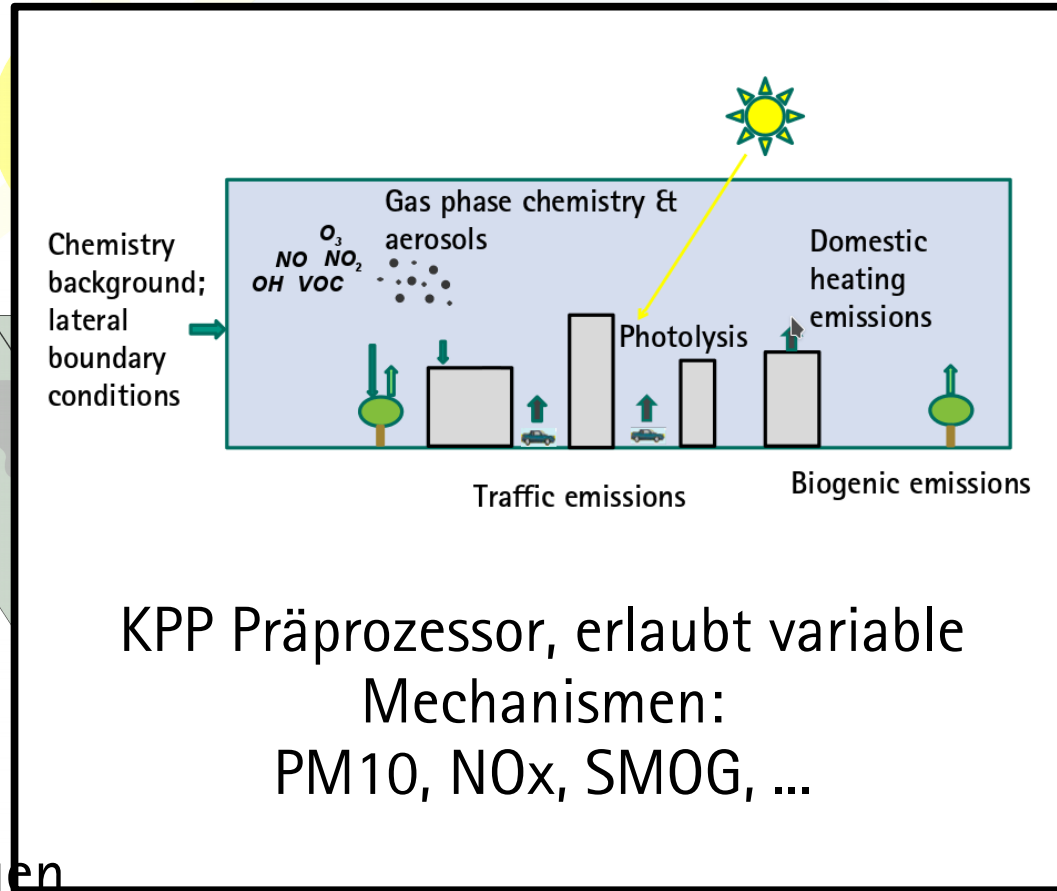
Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

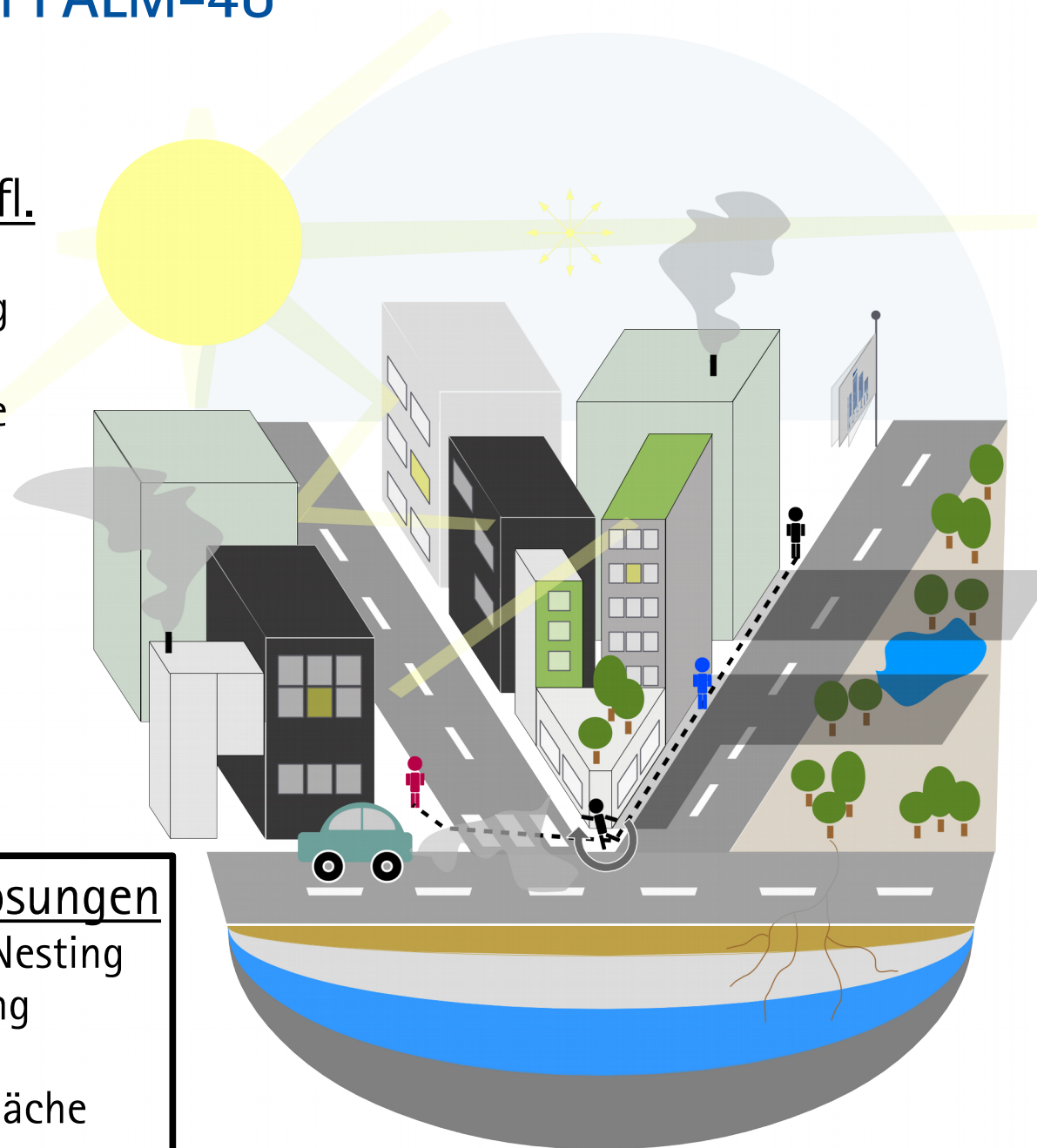
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

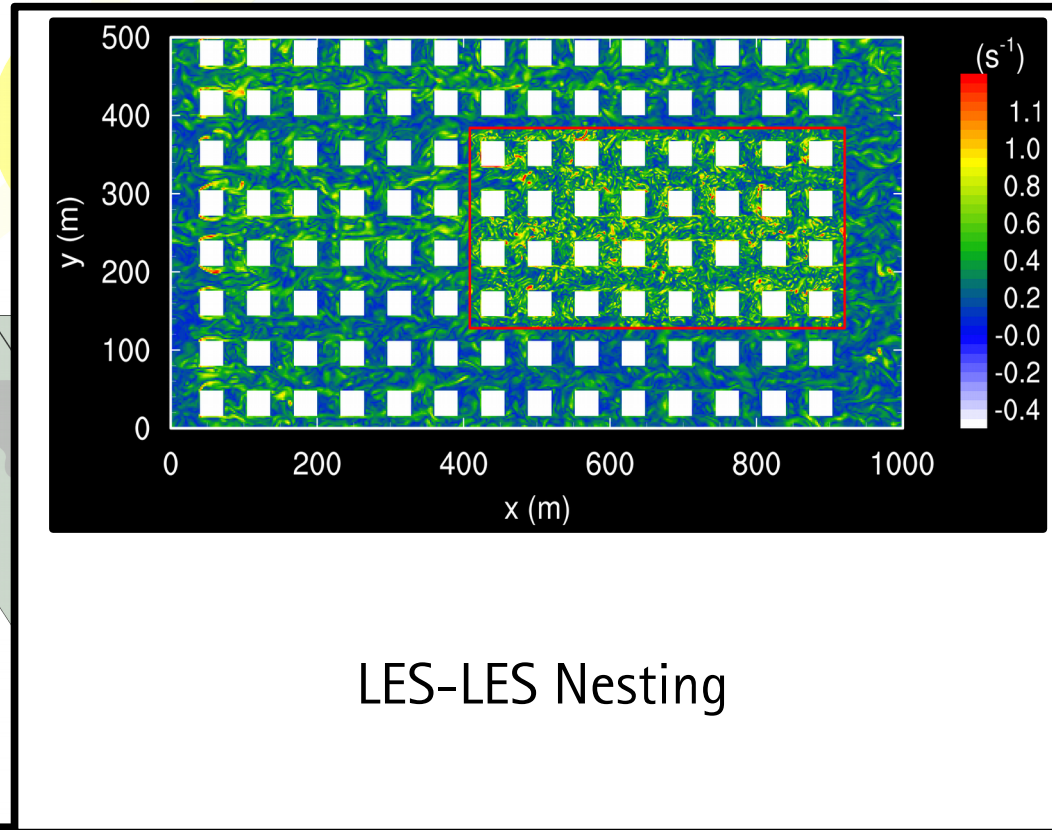
Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

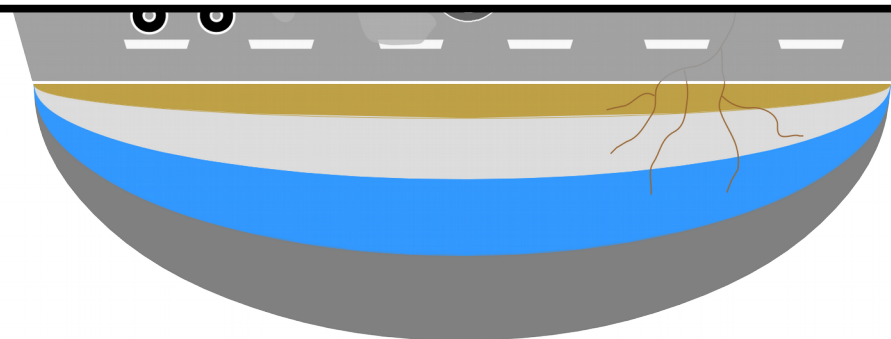
- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes



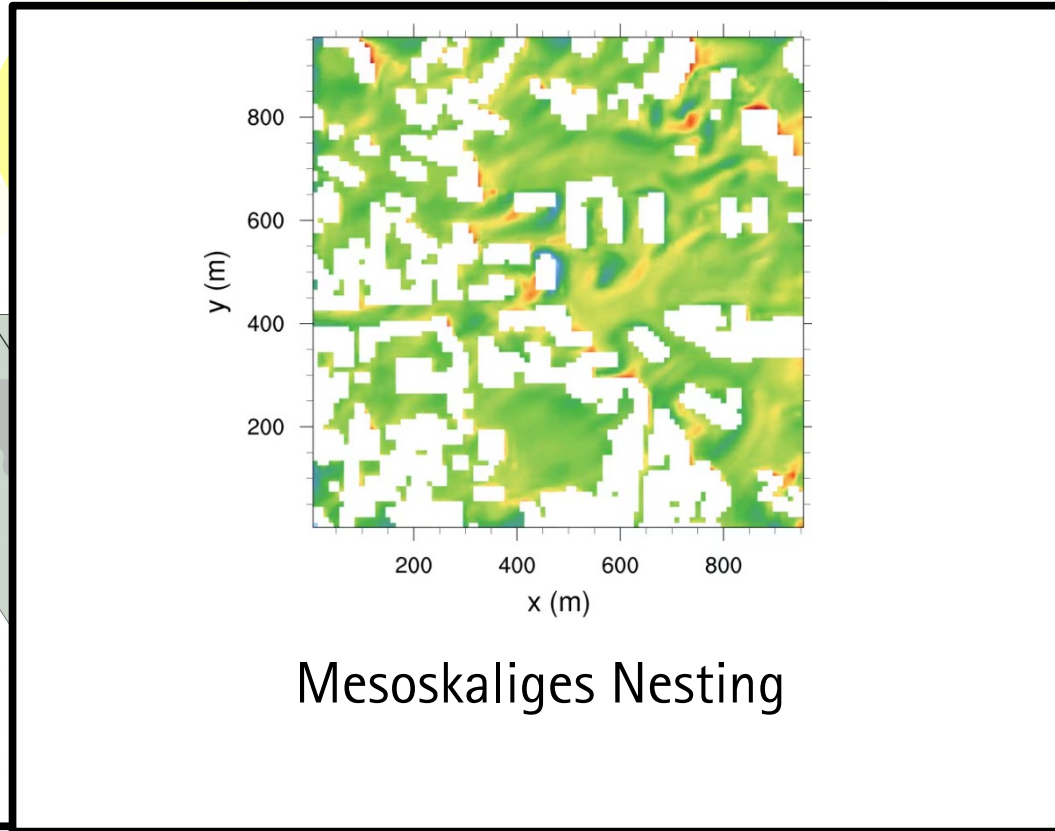
Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

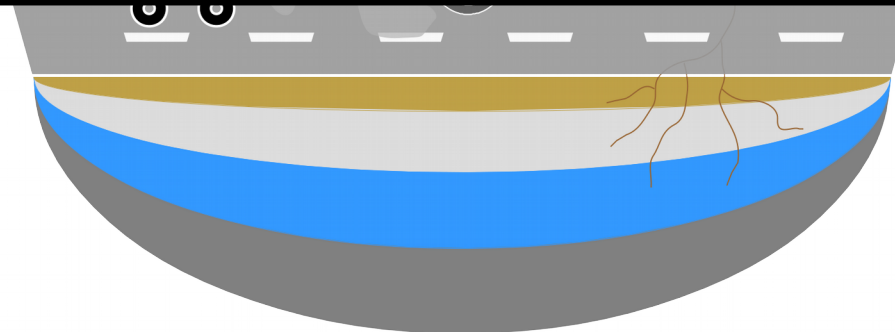
- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes



Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

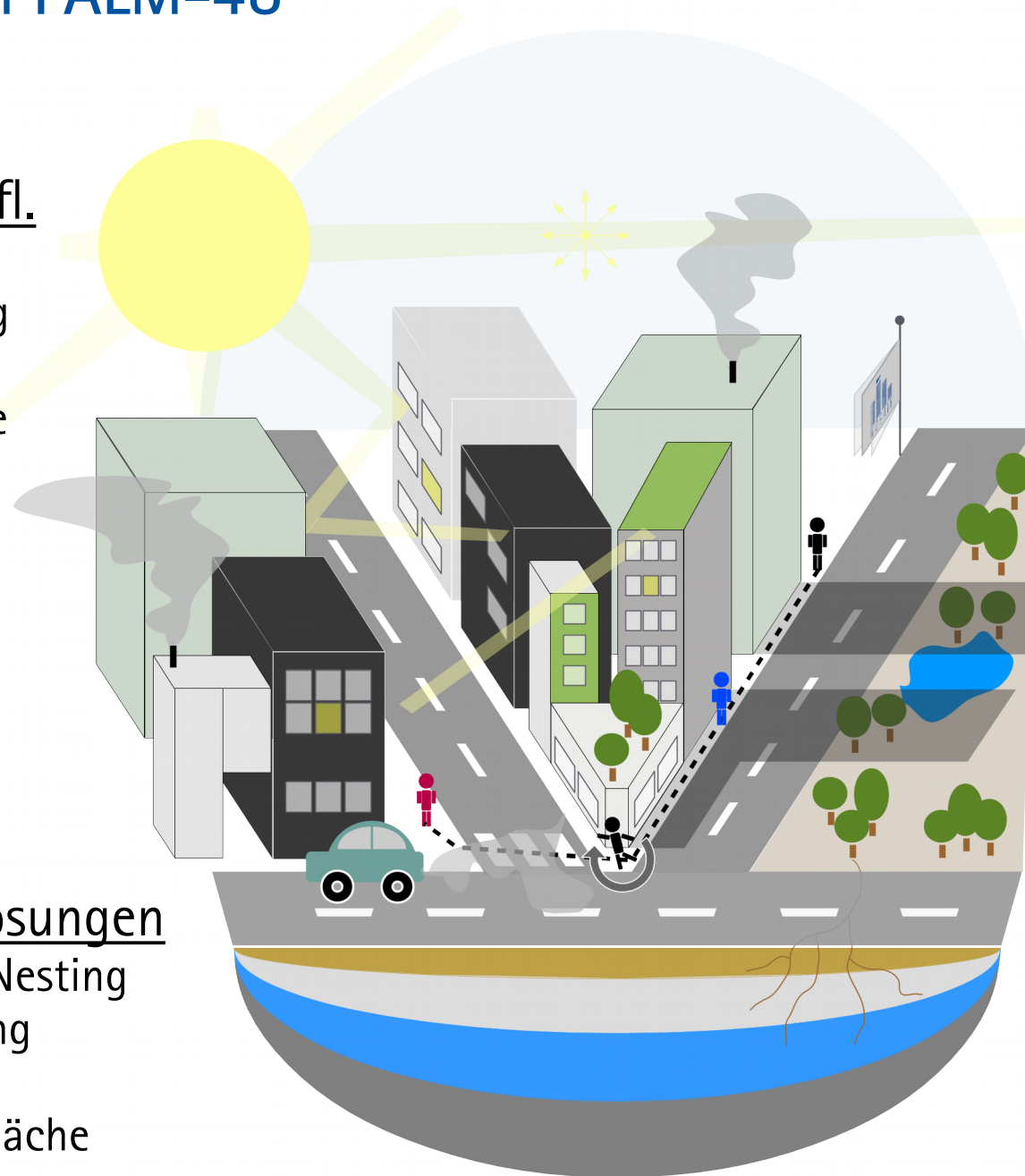
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Prozesse in PALM-4U

Urbane Oberfl.

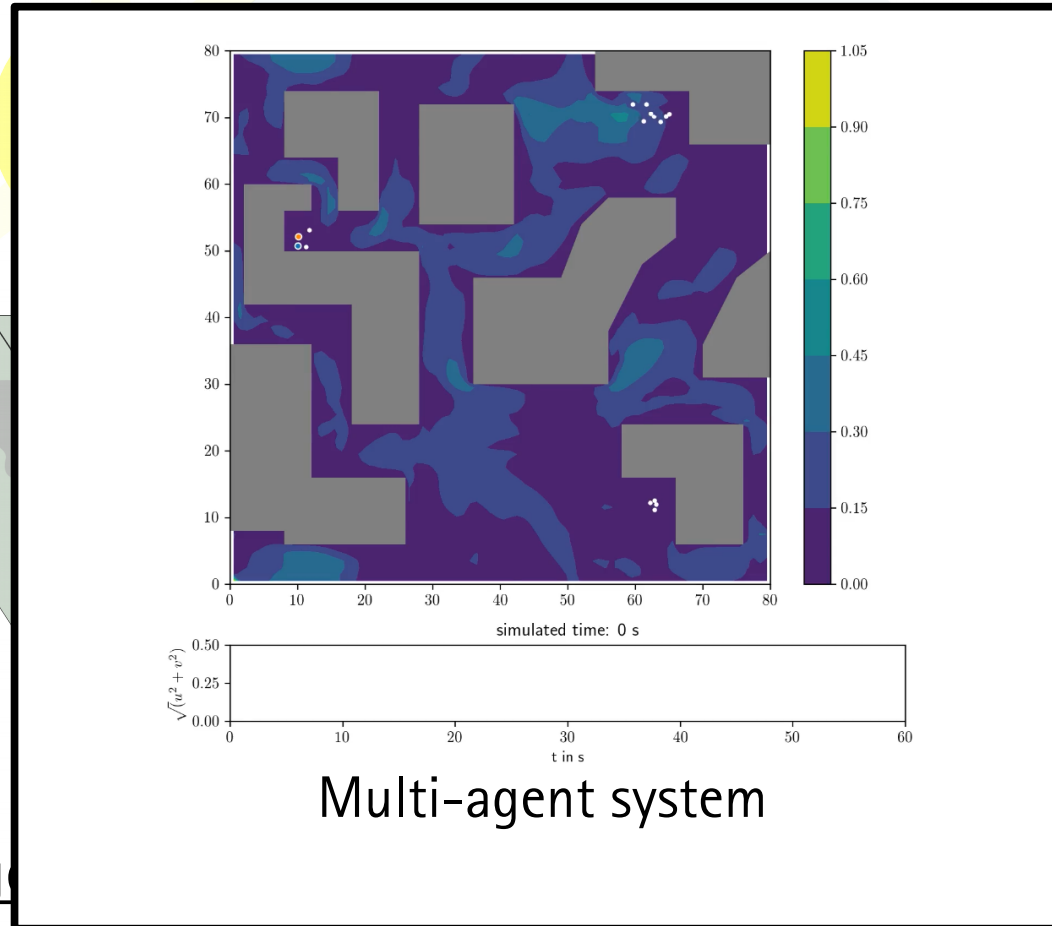
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösung

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Multi-agent system

Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Urbane Oberfl.

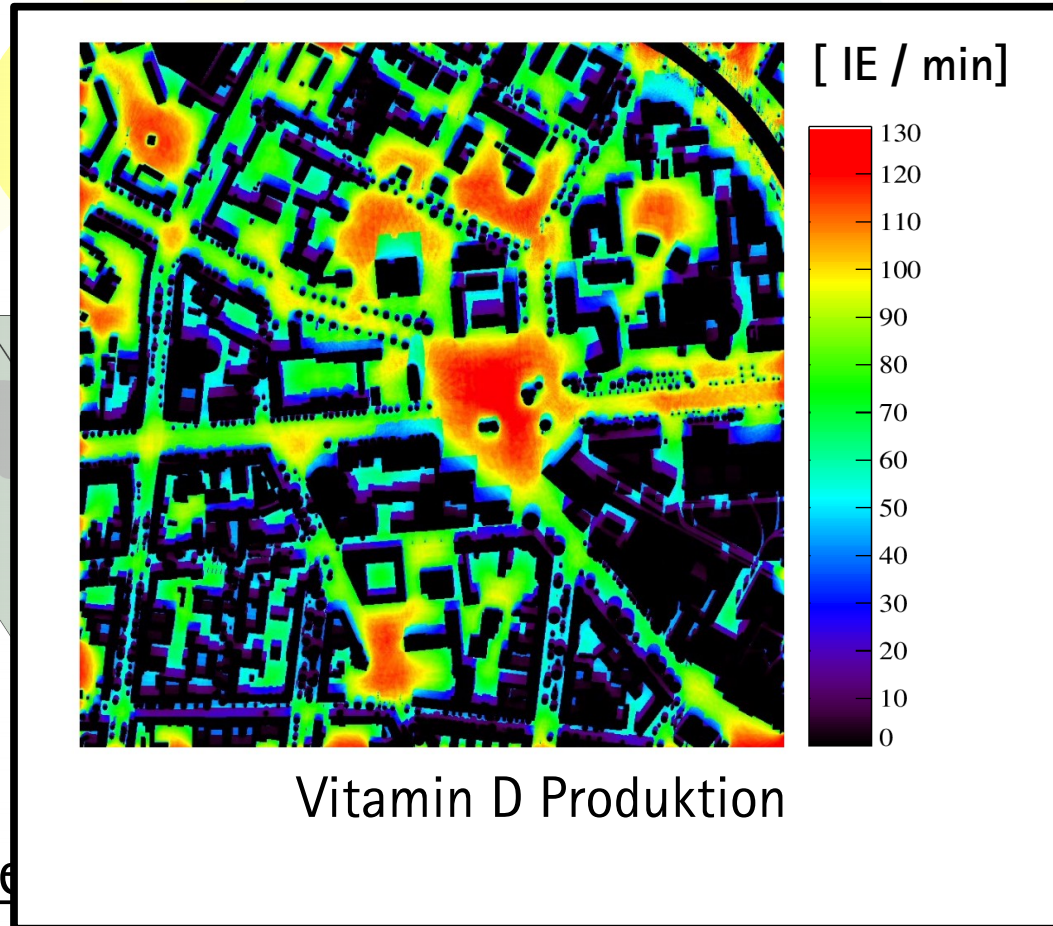
- Energiebilanz
- Wärmeleitung
- Material
- Grünelemente

Chemie

- Transport
- Reaktionen
- Photolyse
- Emissionen

Technische Lösungen

- Mesoskaliges Nesting
- LES-LES Nesting
- RANS Modus
- Benutzeroberfläche



Strahlung

- Energiebilanz
- Schatten
- Reflektionen

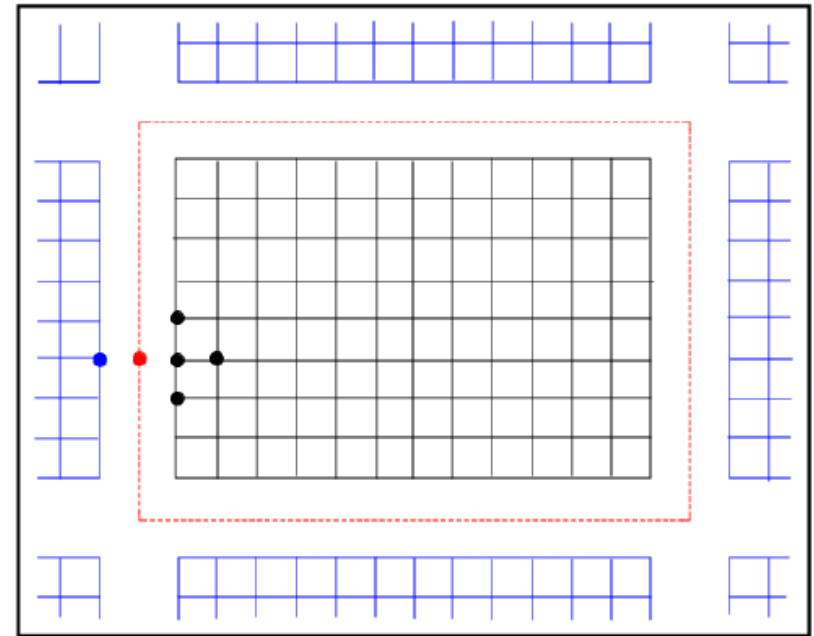
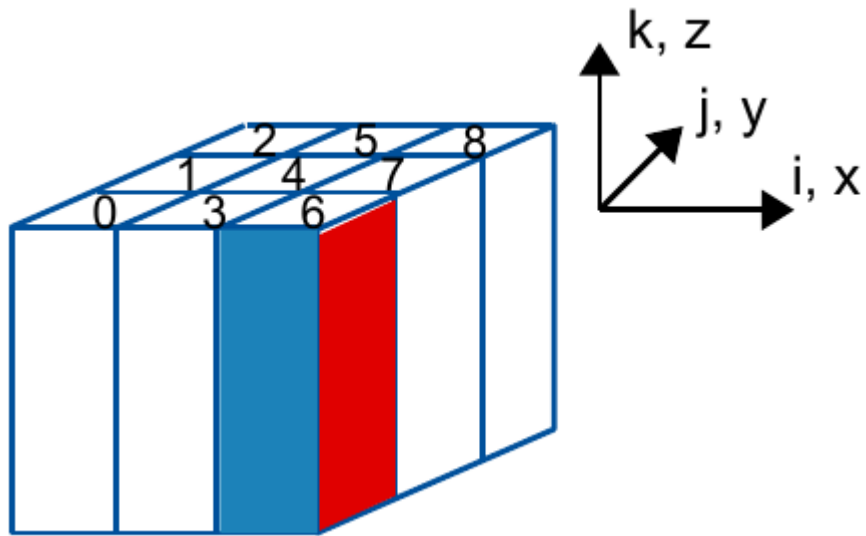
Vegetation & Boden

- Energiebilanz
- Impulssenke
- Schatten
- Wurzeln
- Bodenfeuchte

Auswirkungen

- Multiagentensystem
- Biometeorologische Indizes

Parallelisierung

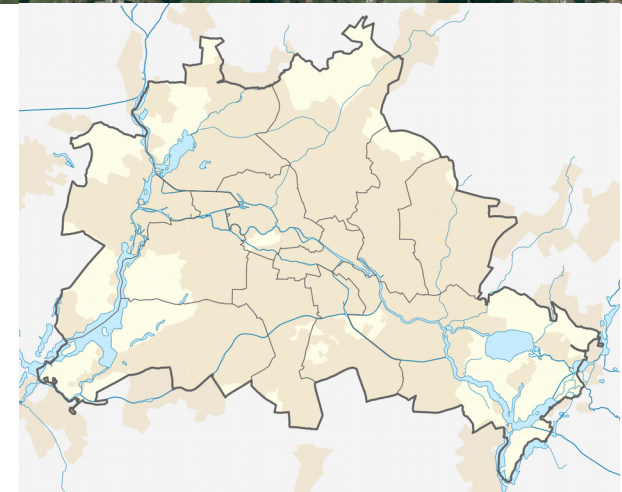
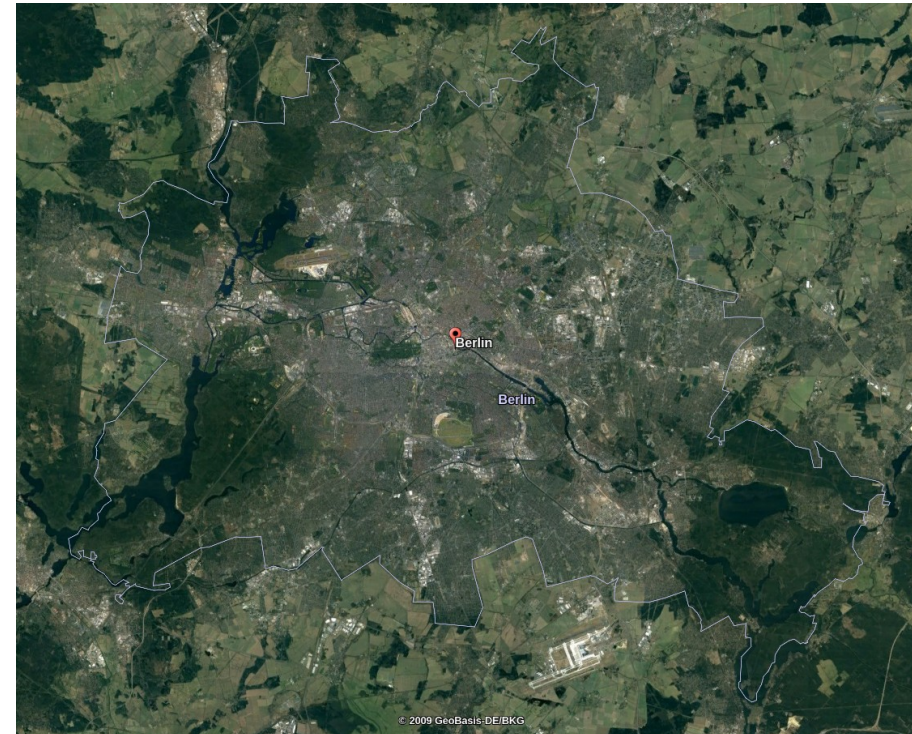


- 2D Gebietszerlegung
- Kommunikation via MPI
- OpenMP Parallelisierung und hybride Parallelisierung
- OpenACC Parallelisierung für GPUs

- Zentrale Differenzenquotienten verursachen lokale Datenabhängigkeiten
- Lösung: Einführung von Geisterrändern → MPI

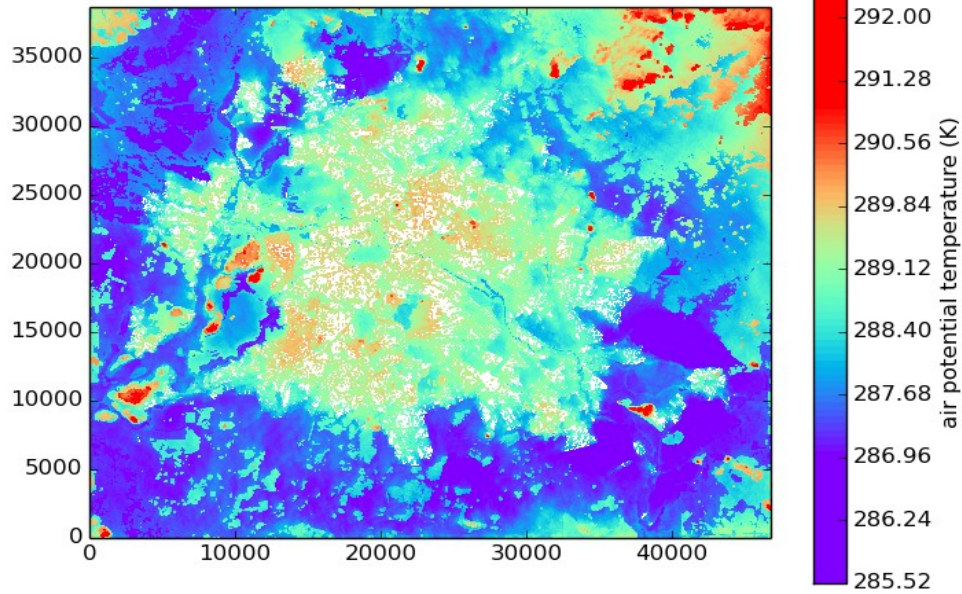
Berlin Setup

Gebiet (x x y x z)	46.8 km x 38.6 km x 3.5 km
Gitterweite	15 m
Gitterpunkte	3120 x 2574 x 236
Antrieb	COSMO-DE Initialprofile 21.07.2013, 00:00 Uhr
Synoptik	Schwachwind, wolkenlos, COSMO-DE 2 m Temperatur > 303 K
Laterale Randbedingungen	zyklisch
Simulationszeit (Spinup)	24 h (Oberflächen + Strahlung)
Simulationszeit (LES)	24 h
Physik	Dynamik, Thermodynamik, Oberflächenmodell, Strahlung, PM10

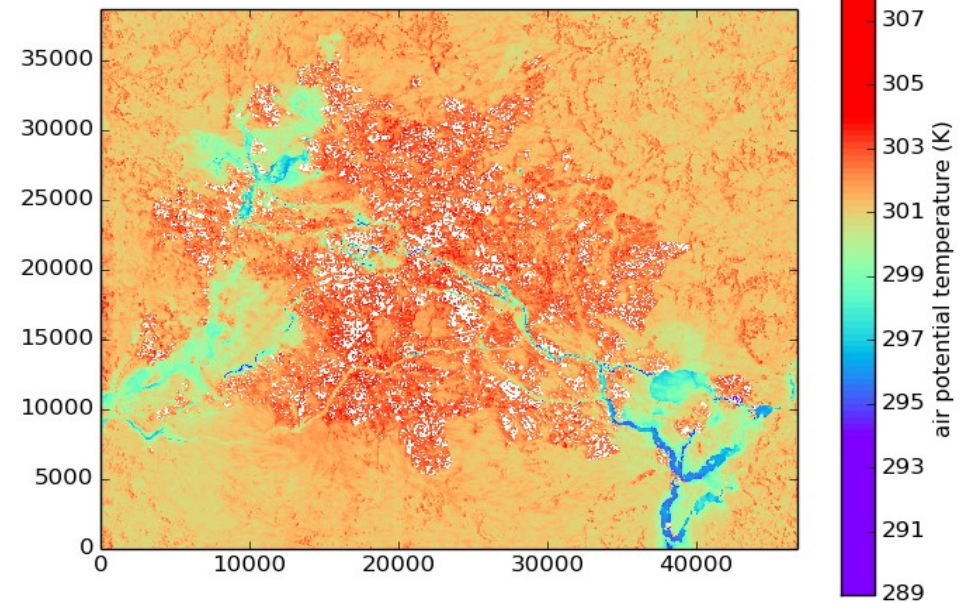


Städtische Wärmeinsel

0300 UTC



1600 UTC

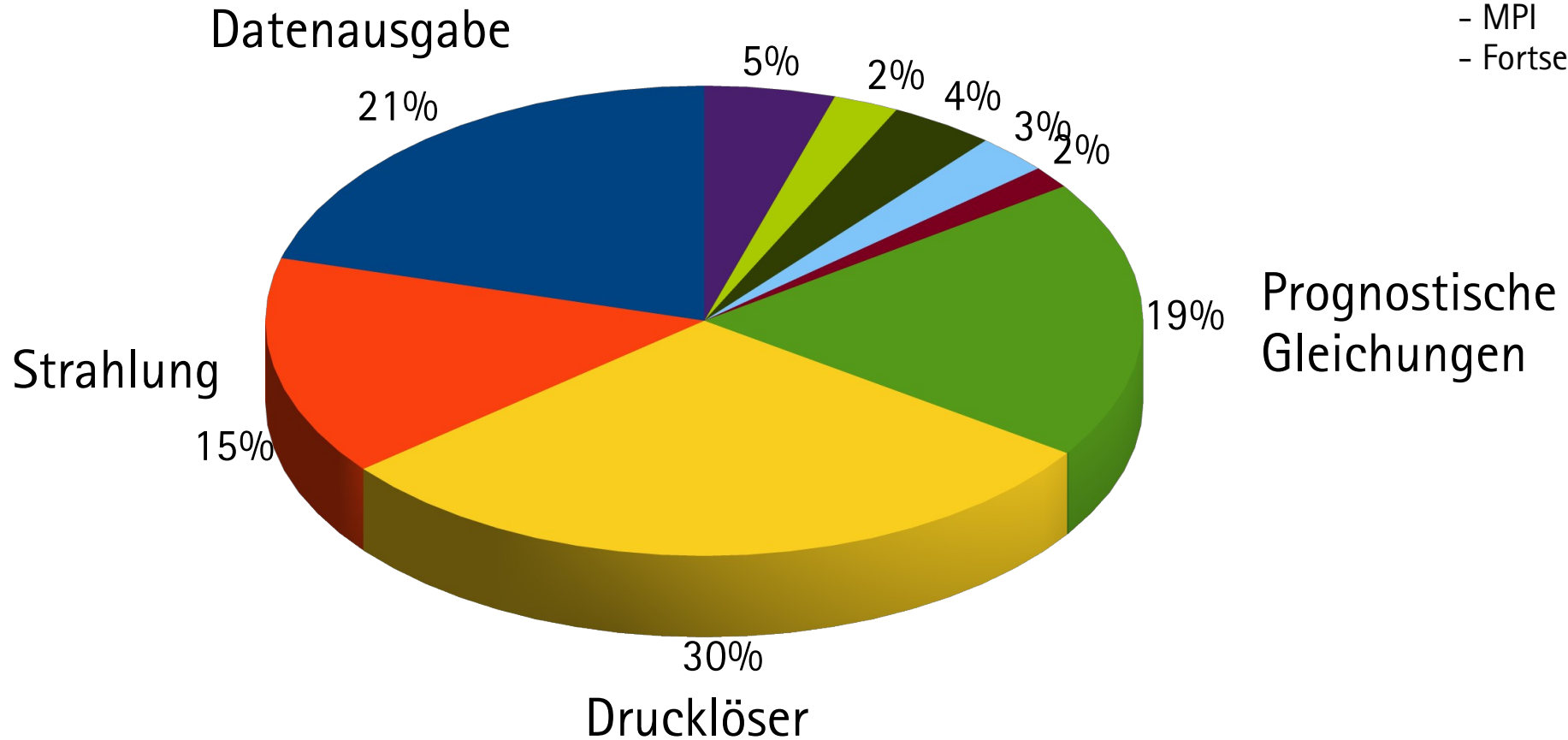


Rechenzeitbedarf

24 h
6048 Kerne
Intel Haswell (Cray XC40)

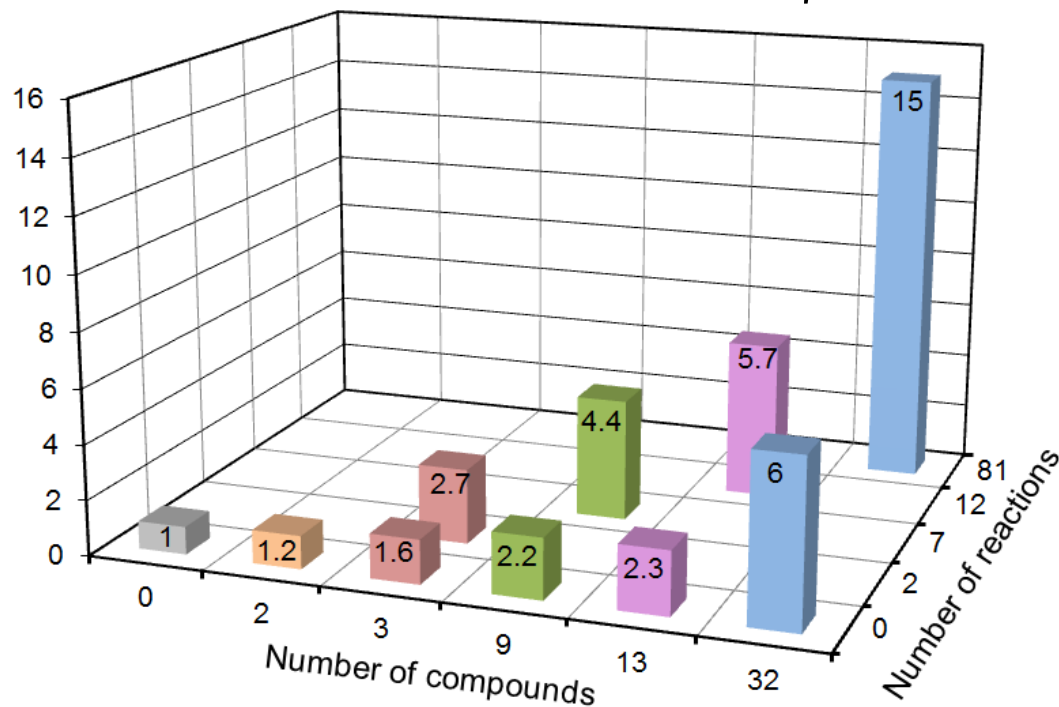
- Datenausgabe (2D)
- Strahlung
- Drucklöser
- Prognostische Gl.
- Datenausgabe (3D)
- Initialisierung
- Austausch Geosterränder
- Chemie (Dynamik)
- Sonstiges

- Oberflächenmodelle
- MPI
- Fortsetzungsläufe



Rechenzeitbedarf: Chemie

© Renate Forkel, KIT



CBM4: Carbon Bond Mechanismus (32 Komponenten, 81 Reaktionen)

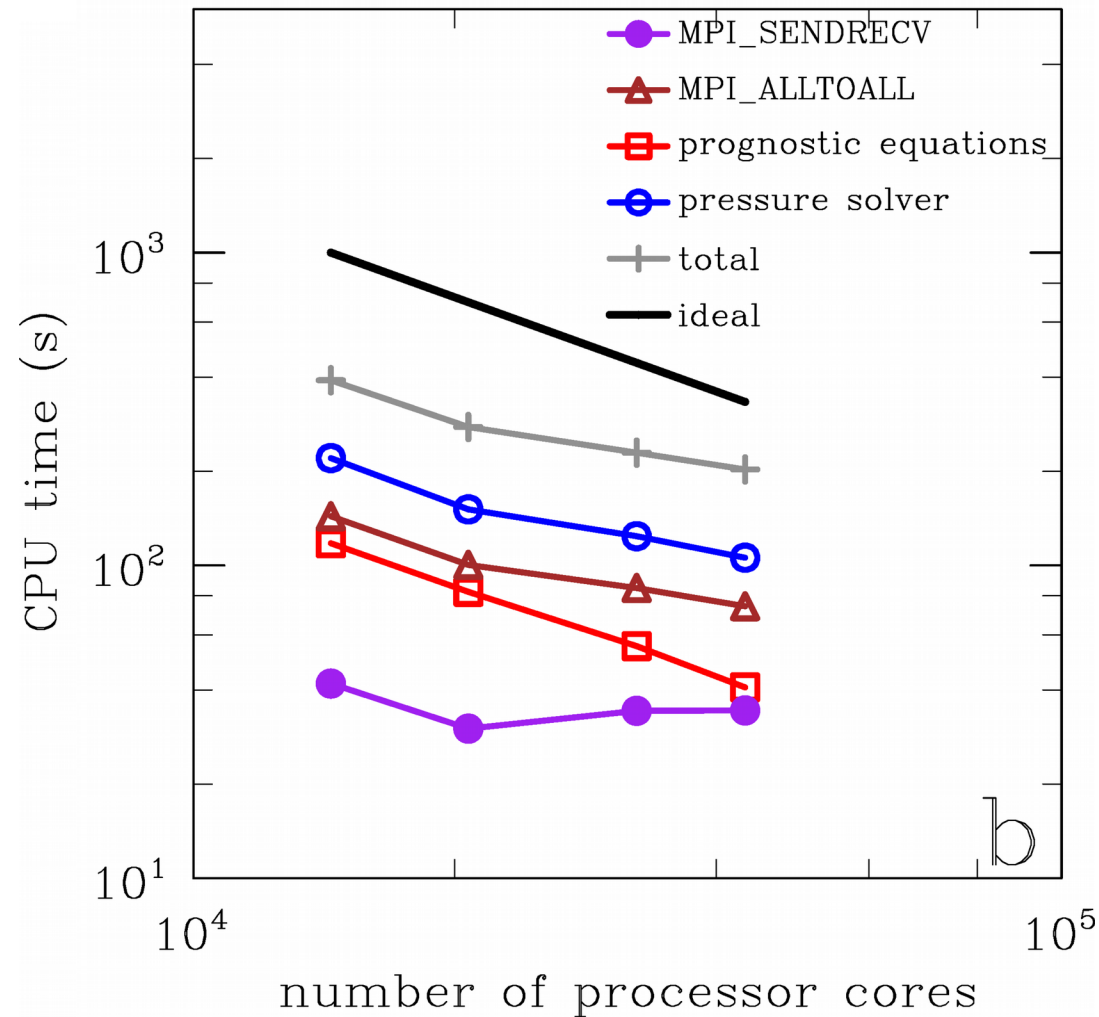
SMOG: Kleiner Photochemiemechanismus (13 Komponenten, 12 Reaktionen)

SIMPLE: Vereinfachung von SMOG (9 Komponenten, 7 Reaktionen)

PHSTAT: Photostationäres Gleichgewicht (3 Komponenten, 2 Reaktionen)

PASSIVE: Zwei passive Tracer (2 Komponenten, 0 Reaktionen).

Skalierungseigenschaften von PALM

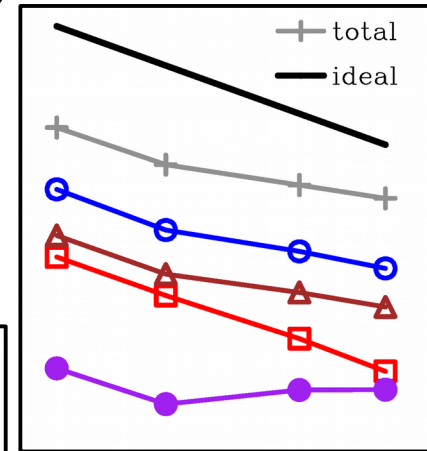


- Prognostische Gleichungen skalieren sehr gut
- Drucklöser skaliert bis ~20.000-30.000 Kerne (MPI_ALLTOALL)
- Lösung: kompressibles Gleichungssystem!

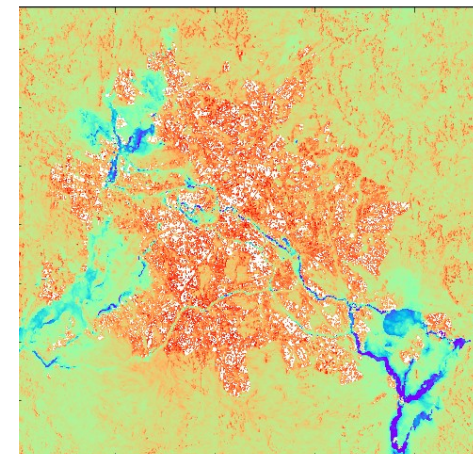
Zusammenfassung



- **PALM:** Hochoptimiertes, parallelisiertes LES Modell
 - Skaliert auf bis zu 40.000 Rechenkerne
 - Diverse eingebettete Modelle und Prozesse



- **PALM-4U:** Neues Stadtklimamodell
 - Umfassende Prozessmodellierung für urban Fragestellungen
 - Gebäudeauflösende Simulationen für ganze Großstädte mit vertretbarem Aufwand durchführbar



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



<http://palm4u.org>



<http://palm-model.org>