

Digitale Stadtstrukturkartierung – Analyse der stadtstrukturellen Grundlagen und thermale Charakterisierung von Stadtstrukturen

Produkt 3.1.2a

Version: 2.0
Status: Final
Datum: 30.06.2011

TP 3.1.2 – Grün- und Freiflächen, städtebauliche Strukturen, biometeorologische Effekte –

TP-Leiter: Dr. Sebastian Hoehstetter, Prof. Dr. Wolfgang Wende
Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR)

Bearbeiter: Jörg Hennersdorf
Dr. Tobias Krüger
Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR)

Kontakt: Tel.: 0351/4679-0
Fax: 0351/4679-212
E-Mail: w.wende@ioer.de; j.hennersdorf@ioer.de;
t.krueger@ioer.de

REGKLAM Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen: 01 LR 0802

Koordinator: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR)
Weberplatz 1, 01217 Dresden
Projektleiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Müller

www.regklam.de

Inhaltsverzeichnis

Teil A: Analyse der stadtstrukturellen Grundlagen

(Jörg Hennersdorf)

1. Einleitung	4
2. Datengrundlagen.....	4
3. Methoden	8
4. Ergebnisse.....	13
5. Weiterführende Literatur	15

Teil B: Thermale Charakterisierung von Stadtstrukturen – Satellitengestützte Analyse von Oberflächentemperaturen

(Dr. Tobias Krüger)

1. Einleitung	17
2. Datengrundlagen.....	18
2.1 Datenrecherche und Beschaffung für das Teilprojekt	18
2.1.1 Landsat.....	18
2.1.2 ASTER	19
2.2 Abdeckung der Modellregion mit Satellitendaten.....	21
2.2.1 Abdeckung durch Landsat-TM/ETM+	21
2.2.2 Abdeckung durch Terra-ASTER.....	22
3. Methoden der Satellitendatenauswertung	23
3.1 Methodik zur Verarbeitung der Landsatdaten	23
3.1.1 Radiometrische Kalibrierung	23
3.1.2 Wolkendetektion	24
3.1.3 Atmosphärenkorrektur der Thermaldaten	24
3.1.4 Problem der Schätzung der Emissivität	26
3.2 Emissivitätsanalysen.....	27
3.2.1 Zusammenhang NDVI und Emissivität.....	28
3.2.2 Zusammenhang der Emissivität mit stadtstrukturellen Eigenschaften.....	29
4. Ergebnisse der Datenmodellierung.....	32
4.1 Ableitung von Emissivitätswerten für die LST-Berechnung	32
4.2 Berechnung der Oberflächentemperatur	34

4.2.1	Einzeldatensätze und abgeleitete Temperaturmittelwerte	34
4.2.2	Interpretation der Ergebnisse	35
4.2.3	Verwertung und Fortführung der Ergebnisse	36
4.3	Karten	39
5.	Literatur	47

1. Einleitung

Die städtebauliche Struktur mit Ihrem Nutzungs- und Bebauungsmuster hat bei gegebener Einstrahlung einen erheblichen Einfluss auf die konkreten örtlichen Temperaturverhältnisse. Besonders relevant ist dieser Aspekt bei austauscharmen Wetterlagen mit stabilen Schichtungen, die zur Ausprägung städtischer Wärmeinseln führen. Diese Wärmeinseln werden häufig durch die Topografie verstärkt. Im Sommer treten die größten Übertemperaturen in heißen Nächten auf und beeinträchtigen das Schlafklima. Städteplanerische Maßnahmen können eine Hitzewelle nicht verhindern, indirekt aber durchaus zu örtlichen Verbesserungen beitragen. Ignorieren städteplanerische Vorgaben diesen Aspekt, können sie andererseits ungünstige strukturelle Voraussetzungen schaffen, die den thermischen Effekt verstärken.

Eines der Ziele von Teilprojekt 3.1.2 ist es, Grundlagen und Optionen für Anpassungsstrategien der Stadtentwicklung durch die frühzeitige Berücksichtigung klimawirksamer Aspekte bei der Stadtplanung bereitzustellen. Dabei werden statistisch ableitbare Zusammenhänge zwischen struktureller Ausprägung und Überwärmungseffekten herausgearbeitet. In einem späteren Schritt erfolgt die statistische Analyse des Anteils des Grünvolumens und der versiegelten Flächen der Strukturtypen (siehe Produkt 3.1.2 e). Als besonders relevantes Strukturelement werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Stadtbäume mit untersucht (Produkt 3.1.2 d). Grundlage für die gesundheitspolitische Vorsorge ist die Darstellung besonders sensibler Gebiete, z. B. mit einem hohen Anteil an älterer Bevölkerung oder Einrichtungen wie Alten- und Pflegeheimen, Krankenhäusern aber auch Kindergärten u. ä (Produkt 3.1.2 c).

Die Analyse der stadtstrukturellen Situation bildet die Grundlage für die oben genannten Bearbeitungsschritte. Im Teil A des Teilprojektes 3.1.2 a standen hierzu einerseits die Abbildung des strukturellen Zustands insbesondere durch Berechnung siedlungsstruktureller Kennzahlen, andererseits die Projektion siedlungsstruktureller Kennzahlen auf ca. 2020 durch Auswertung des Flächennutzungsplans der Stadt Dresden im Mittelpunkt.

Das Teilprojekt erhebt den Anspruch, Anpassungsoptionen an Überwärmungseffekte für die gesamte Modellregion abzuleiten. Aus diesem Grund erfolgt die Untersuchung zweistufig. Zunächst werden anhand der Stadt Dresden Detailuntersuchungen durchgeführt. Dies ist notwendig, da die Datenlage diese Detailuntersuchungen ausschließlich für die Stadt Dresden hergibt. Anschließend erfolgt eine Transformation der in der Stadt Dresden gewonnenen Aussagen in die Modellregion.

2. Datengrundlagen

Modellregion

Für die gesamte Modellregion liegen die Daten des **ATKIS-Basis-DLM25** vor. Das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) beschreibt die Oberfläche der Erde mit Digitalen Landschafts- und Geländemodellen. Im Rahmen von ATKIS werden geotopographische Basisdaten bundesweit digital bereitgestellt. Als amtliche digitale topographische Datengrundlage bildet ATKIS auch die Raumbezugsbasis für die Anbindung und Verknüpfung mit geothematischen Fachdaten. Es trägt den Charakter eines Geobasisinfor-

mationssysteme der Vermessungs- und Katasterverwaltungen der Bundesländer. ATKIS ist in Objektklassen, Objektartgruppen und Objektarten gegliedert. Diese werden durch Attribute beschrieben. Von besonderem Interesse für die stadtstrukturellen Untersuchungen ist die Objektart 2315 „Gebäude“. Der Datensatz dieser Objektart war zum Zeitpunkt des Projektstarts noch nicht vollständig verfügbar. Erst mit der Lieferung im August 2009 war der Gebäudedatensatz für die Modellregion vollständig bereitgestellt.

Weiterer für die Modellregion flächendeckend vorliegender Datensatz ist die **Biotoptypen- und Landnutzungskartierung** (BTLNK) im Freistaat Sachsen, Ausgabe 2005. Die BTLNK-Daten geben Auskunft über den Ist-Zustand der Landschaftsausstattung des Jahres 2005 im Freistaat Sachsen. Die Lage der Geometrien ist an die CIR-Orthobilder aus der Befliegung von 2005 angepasst. Die BTLNK ist ein flächendeckender Datenbestand mit Flächen-, Linien- und Punktgeometrien. Die Ausweisung der Landschaftsausstattung erfolgt in Form von Kartiereinheiten, die durch einen neunstelligen Code verschlüsselt sind.

Stadt Dresden

Die Datenlage für das Stadtgebiet ist wesentlich besser und umfangreicher. Neben den in der gesamten Modellregion verfügbaren Daten sind insbesondere Daten des Stadtvermessungsamtes und des städtischen Umweltamtes nutzbar.

Visuell wird die Stadt durch **Luftbilder** verschiedener Jahre beschrieben. Das aktuellste Luftbild ist ein Mosaik aus den Jahren 2010 (Zentrum, Westen, Norden) und 2009 (Süden, Osten).

Für das Stadtgebiet lagen Rasterdaten des **Digitales Geländemodells (DGM)**, das aus Bodenpunkten interpoliert wurde, und ein Digitales **Oberflächenmodell (DOM)**, das aus allen Messpunkten mithilfe von Maximalfiltern errechnet wurde, vor. Die räumliche Auflösung der Modelle betrug 1x1 m. Durch Differenzbildung aus DOM und DGM wurde ein **normiertes Digitales Oberflächenmodell (nDOM)**, welches die Höhe von Objekten über dem Grund beschreibt, berechnet. Das nDOM bildete die Basis für weitere Untersuchungen und Berechnungen. Es stellt z. B. eine wichtige Grundlage für die bioklimatischen Modellierungen mit den Programmen RayMan Pro und ENVI-met in den Produkten 3.1.2 b und 3.1.2 c dar.

Aus der Digitalen Stadtkarte **DSK500** liegt der Layer der **Gebäude** vor. Dieser Layer enthält alle Gebäude der Stadt Dresden, ergänzt mit Attributen wie Adresse, Geschossigkeit, Dachform, Nutzung u. ä.

Die **Stadtstrukturtypenkartierung** basierend auf der Karte der statistischen Blöcke der Stadt Dresden beschreibt unterschiedliche Struktur- und Nutzungstypen. Flächen mit gleichartiger baulicher Struktur, also mit einem homogenen Erscheinungsbild, werden zu Struktureinheiten zusammengefasst und einem der definierten Typen zugeordnet. Die einzelnen Struktureinheiten werden hinsichtlich weiterer Merkmale, wie z.B. dem Versiegelungsgrad bewertet. Die Bewertung erfolgte grundsätzlich auf den Geometrien der Statistischen Blöcke der Stadt. Beim Vorkommen mehrerer Strukturtypen in einem Block gilt das Dominanzprinzip. Aufgrund der Verwendung kommunalstatistischer Einheiten ist das Koppeln mit anderen statistischen Kenngrößen möglich. Für das Erkennen grundlegender Entwicklungstrends wurde die Kartierung stetig fortgeschrieben. Die Erstkartierung erfolgte 1997. Der letzte Stand stammt von 2006. Zunächst erfolgte die Kartierung anhand von hochauflösenden Satellitenbildern (IRS-1C, SPOT5). Zuletzt wurden zunehmend Luftbilder verwendet. Die Erstellung und Fortschreibung erfolgte mit einer Ausnahme durch das IÖR. Die verwendete No-

menklatur der Strukturtypen ist das Ergebnis enger Abstimmung zwischen IÖR und Umweltamt der Stadt Dresden. Tabelle 1 weist diese aus.

Tabelle 1: Nomenklatur der Strukturtypenkartierung in Dresden

Strukturtyp	Kurzbezeichnung
Geschlossene Blockbebauung	1
Offene Blockbebauung	2
Zeile/Reihe	3
Einzel-/Doppelhaus	4
Mischformen (Stadt- und Wohngebietszentren, alte Ortskerne, historische Gebäude, Bildung/Erziehung, Verwaltung, Medizin, Wohnheime)	5
Großflächige Bebauung	6
Sport/Spielanlagen	7
Kleingärten	8
Gleisanlagen	9
Acker	A
Grünland/Gärtnerreien	B
Parks/Zoo	C
Friedhöfe	D
Wald	E
Wasserflächen	F
Abgrabungen/Aufschüttungen	G
Baustellen	H
Verkehrsflächen, Garagen	I
Brachflächen	K
Blockrestflächen	L

Weitere Arbeitsgrundlage ist die **Stadtbiotopkartierung** des Grünflächenamtes der Stadt Dresden (Grundlage CIR-Bildflug 1999) mit einer Gliederung in über 100 Biotoptypen, die durch Strukturmerkmale und Zusatzinformationen weiter differenziert werden. Diese Gliederung stellt eine gute Grundlage für die Analyse der Vegetationsstrukturen der Stadt Dresden dar.

In einem früheren Forschungsprojekt am IÖR¹ wurde die Stadtbiotoptypenkartierung der Stadt Dresden modifiziert und auf vegetationsstrukturell relevante Biotoptypen reduziert. Durch Auswahl, Zusammenfassung und Differenzierung sind aus den Dresdner Stadtbio-

¹ Methodische Ansätze zur Sicherung und Entwicklung ökologischer Qualitätsniveaus in städtischen Siedlungsräumen (IÖR-Projektnummer P 105)

toptypen Projektbiotoptypen entwickelt worden. Die Auswahl erfolgte mit Hilfe der Beschreibung der Stadtbioptypen, der Beschreibung der Merkmale der Vegetations- und Nutzungsstrukturen der unbebauten Grundstücksflächen sowie der weiteren Zusatzinformationen aus der Stadtbiotopkartierung Dresden. Eine besondere Bedeutung bei dem Auswahlverfahren hatten der Versiegelungsgrad, die Vegetationsschichtung sowie die Nutzungs- und Pflegeintensität der Bioptypen. Die ausgewählten vegetationsstrukturell bedeutsamen Bioptypen sind mit Bezug auf die Dresdner Stadtbioptypengliederung zusammengefasst, in wenigen Fällen auch weiter gegliedert worden: Die Bioptypen der Wohnbebauung und gemischten Bauflächen und die Bioptypen der Industrie-, Gewerbe- und Sonderflächen wurden auf Grund ähnlicher Versiegelungsgrade zusammengefasst und durch die ausführlich beschriebenen Strukturmerkmale unterschieden. Ergebnis sind 52 IÖR-Projektbiotoptypen. Es erfolgte eine generelle Höhenstufen der Vegetationsschichtung.

Zur Ermittlung der Höhenstruktur der Vegetationsschichtung wurde, unter Berücksichtigung der mittelmaßstäbigen Ebene, eine Orientierung auf generelle Höhenstufen der Vegetationsschichtung als angemessen erachtet. Es wurden der Untersuchung drei generelle Höhenstufen zu Grunde gelegt (Höhenstufe „niedrig“: 10 cm; 50 cm; 80 cm; Höhenstufe „mittel“: 100 cm; 150 cm; 300 cm, Höhenstufe „hoch“: 10 m; 15 m). Jeder der 52 IÖR-Projekt-Bioptypen ist durch eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe, insbesondere durch Biologen, auf der Grundlage des Biotopschlüssels bzgl. der Merkmale der Vegetations- und Nutzungsstrukturen in seiner durchschnittlichen Höhe innerhalb der Höhenstufen „niedrig“, „mittel“, „hoch“ eingeschätzt worden.

Die biotopspezifische Vegetationsstruktur wird mit dem Grünvolumen und den Flächenanteilen der niedrigen, mittleren und hohen Vegetationsschichten sowie den Flächenanteilen ohne Vegetation und den Flächenanteilen mit Überbauung gemessen. Die Messung der biotoptypspezifischen Vegetationsstrukturen erfolgte im Rahmen einer vegetationsstrukturellen Analyse auf der Grundlage eines Naturfarbluftbild-Mosaiks (Dresden 1999) anhand von Repräsentanten.

Die IÖR-Projektbiotoptypenkarte wurde in Zusammenarbeit der Arbeitspakete 3.1.2 e und 3.1.2 a weiter qualifiziert.

Grundlage dieser Qualifizierung ist insbesondere die sogenannte **Abwasserkarte** der Stadt Dresden. Ihr Bezugsjahr ist im Wesentlichen das Jahr 2000. Dresden hat die ehemalige Abwassergebühr in eine getrennte Schmutz- und Niederschlagswassergebühr überführt. Die Niederschlagswassergebühr errechnet sich aus dem Anteil der überbauten und versiegelten Fläche eines Grundstücks. Das Gebührensplitting erhöht die Gebührengerechtigkeit, wird dem Verursacherprinzip besser gerecht und fördert letztlich das Problembewusstsein zum Thema „Bodenversiegelung“. Voraussetzung für die gesplittete Gebührenerhebung ist eine grundstücksbezogene Datenbank, die genaue Flächenangaben zu den überbauten, befestigten (voll- und teilversiegelt) und unbefestigten Grundstücksflächen beinhaltet. Diese wurde durch Luftbildkartierung der versiegelten und überbauten Flächen im Auftrag der Stadtentwässerung Dresden GmbH erarbeitet. Dazu wurden Luftbilder im Bildmaßstab 1 : 5000 orthorektifiziert und nach einer „Auswerte- und Erfassungsrichtlinie“ unter stereoskopischer Sicht digitalisiert. Die Geometriedaten dieser Erhebung, einschließlich des Bodenversiegelungswertes für jede Fläche, standen für die vorliegenden Untersuchungen flächendeckend für die Stadt Dresden zur Verfügung. Die Daten wurden von der Stadtentwässerung Dresden im DXF-Format bezogen. Die Abwasserkarte differenziert u.a. Dächer, Gründächer, Wasser-

undurchlässige Flächen (Beton, Asphalt, Platten), Teildurchlässige Flächen (Pflaster, Platten mit versickerungsfähigen Fugen), Schwachableitende Flächen (wassergebundene Decken, wie Kies und Schotter) sowie unbefestigte Flächen, wie Rasen, Garten etc. Sie ermöglicht Rückschlüsse auf Überbauungsgrad, Versiegelungsgrad und Abflussbeiwert.

Der Vorentwurf zum **Flächennutzungsplan** der Stadt Dresden diente im weiteren Projektverlauf insbesondere der Projektion der Flächennutzung ins Jahr 2020. Der textliche Teil des FNP-Vorentwurfs liegt ebenso vor wie das Planwerk, bestehend aus dem Hauptplan sowie 19 Beiplänen in Form von GIS-Datensätzen. Besonders die Beipläne zu Flächenpotenzialen sind hier von Interesse.

3. Methoden

Die Analyse der Strukturen legt den Strukturtypenansatz zu Grunde. Grundsätzlich beschreibt die Strukturanalyse Wirkungszusammenhänge von Strukturen (Siedlungsstrukturen, Bebauungsstrukturen, Grünstrukturen etc.) und Zuständen und damit einhergehenden Leistungen. Indikatoren sind beispielsweise die Flächenzerschneidung, die Bodenversiegelung oder das Grünvolumen, der Bodenpreis. Damit können das sozioökonomische und ökologische Leistungsvermögen der Flächen abgebildet sowie Rückschlüsse auf die Lebensqualität gezogen werden.

Die Strukturanalyse erfolgte auf Basis Geographischer Informationssysteme (GIS). GIS-Analysen ermöglichen die Auswertung raumbezogener Fragestellungen zu den Wirkungszusammenhängen beispielsweise von Flächennutzungsstruktur bzw. Stadtvegetationsstruktur und standortbezogener klimatischer Situation, die im Projekt eine zentrale Bedeutung besitzen. Im Ergebnis stehen Daten und Kenngrößen, die als Input zur klimatischen Modellierung (Bestimmung mikroklimatischer Ausgleichsfunktionen, Klimaprojektionen, Szenarien) Anwendung finden.

Die GIS-Analyse reicht von einfachen Verschneidungen, räumlichen bzw. zonalen Abfragen bis hin zu komplexen Nachbarschaftsuntersuchungen mit der Ermittlung einer Vielzahl von gebäude- und blockbezogenen Kenngrößen, wie beispielsweise in SettlementAnalyzer (SEMENTA®).

Die ArcMap-Programmerweiterung SEMENTA® ist ein Programm zur vollautomatischen Ableitung planungsrelevanter Siedlungskennwerte auf Basis der Topographischen Karte DTK25(-V) und des ATKIS Basis-DLM. Es wurde am Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung entwickelt und ermöglicht u.a. sehr großflächige Siedlungsanalysen, wie sie z. B. die Regionalplanung benötigt. Im Projekt wurde der Schritt der Ableitung der Gebäude auf Basis der Topographischen Karte DTK25(-V) umgangen, da von vornherein die Gebäude aus der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) genutzt wurden. Mit Hilfe komplexer Bildverarbeitungsprozesse wurde der gesamte Gebäudedatenbestand vermessen und typisiert. Unter Nutzung von ATKIS-Blockgeometrien konnten nachfolgend siedlungsstrukturelle Kennzahlen wie die Gebäudezusammensetzung, die Gebäudegrundfläche, die Geschossfläche, das Gebäudevolumen oder die Wohnungs- und Einwohnerzahl für jeden ATKIS-Baublock berechnet werden. Das entwickelte Programm ermöglicht die Bestimmung siedlungsstruktureller Kennwerte in hoher räumlicher Auflösung für große Gebietskulissen.

Folgende Kennzahlen wurden vollautomatisch abgeleitet:

- **Gebäudetyp:** 11 Wohngebäude- und 2 Nichtwohngebäudetypen
- **Baublocktyp:** 8 Wohngebäude- und 2 Nichtwohngebäudetypen
- **Anzahl der Gebäude:** Anzahl aller Gebäude im Block
- **Gebäudedichte:** Anzahl der Gebäude pro ha Blockfläche
- **Gebäudegrundfläche:** Summe der Gebäudegrundflächen im Block in m^2
- **Gebäudegrundflächendichte:** Anteil der Gebäudegrundfläche an der Blockfläche
- **Mittlere Geschosszahl:** Gewichteter Mittelwert der Anzahl der Geschosse aller Gebäude im Block unter Berücksichtigung der Gebäudetypflächenanteile
- **Geschossfläche:** Summe aller Gebäudegrundflächen multipliziert mit der mittleren Geschosszahl in m^2
- **Geschossflächendichte:** Anteil der Geschossfläche an der Blockfläche. (vergleichbar mit der Geschossflächenzahl GFZ, aber Bezug auf Blockfläche)
- **Gebäudevolumen:** Summe aller Einzelgebäudevolumen im Block in m^3 . Wird berechnet aus der Gebäudegrundfläche und regional differenzierten gebäudetypabhängigen Geschosszahlen und -höhen.
- **Gebäudevolumendichte:** Verhältnis vom Gebäudevolumen zur Blockfläche in m^3/m^2 .
- **Wohnungszahl:** Schätzwert im Block ausgehend vom Gebäudetyp, -fläche und Geschosszahl.
- **Wohnungsdichte:** Wohnungszahl pro ha Blockfläche.
- **Einwohnerzahl:** Schätzwert im Block ausgehend vom Gebäudetyp, -fläche und Geschosszahl.
- **Einwohnerdichte:** Einwohnerzahl pro ha Blockfläche.

Tabelle 2 zeigt die Nomenklatur für die Gebäudetypen.

Tabelle 2: Nomenklatur der Gebäudetypen

Gebäudetypologie (implementiert)					Geplante weiterführende Differenzierung (nicht implementiert)	
Level 1		Level 2			Level 3	
Code	Bezeichnung	Code	Kurzbez.	Bezeichnung	Bezeichnung	Gebäudehöhe/-Geschlosszahl
G1	MFH in Blockstruktur	G11	MFH-G	Mehrfamilienhaus traditionell in geschlossener Bauweise	Mehrfamilienhaus traditionell in geschlossener Bauweise	mittel
		G12	MFH-F	Mehrfamilienhaus (traditionell o. neu) freistehend	Mehrfamilienhaus traditionell freistehend	mittel
					Mehrfamilienhaus Neubau freistehend	mittel
					Villa	niedrig bis mittel
G2	MFH in offener Blockstruktur	G21	MFH-TZ	Mehrfamilienhaus traditionell in Zeile	Mehrfamilienhaus traditionell in Zeile	4-5
		G22	MFH-IZ	Mehrfamilienhaus industriell in Zeile	Mehrfamilienhaus industriell in Zeile (3-7 Geschosse)	4-5
					Mehrfamilienhaus industriell in Zeile (8-14 Geschosse)	hoch
					Mehrfamilienhaus industriell in Zeile (ab 15 Geschosse)	sehr hoch
G23	MFH-HH	Hochhaus (>50m)	Hochhaus (>50m)	sehr hoch		
G3	Ein-, Zweifamilien- und Reihenhäuser	G31	EZFH	Ein- und Zweifamilienhaus	EZFH (Einzelhaus)	niedrig
		G32	RH	Reihenhaus	EZFH (Doppelhaus)	niedrig
					EZFH (Reihenhaus)	niedrig
G33	DH	Dörflich Traditionelles Haus	Dörflich Traditionelles Haus	niedrig		
G4	Nichtwohnnutzung	G41	IG	Industrie/Gewerbe	Industrie, Einzelhandel, Ver- und Entsorgung, Garagen, Gewächshäuser	-
		G42	BFP	ATKIS-Objektart „Besondere funktionale Prägung“ (Verwaltung, Gesundheit/Soziales, Bildung/Forschung, Kultur usw.)	Bildung, Forschung, Kultur, Krankenhäuser, Verwaltung, Schulen	-

SEMENTA[®] wird derzeit weiter qualifiziert und hinsichtlich der Typen verfeinert. Dieses als SEMENTA[®] 2.0 bezeichnete Programm wurde in REGKLAM bereits angewendet und differenziert die Gebäudetypen in G1 und G3 weiter aus. Es wurden die Typen G13 – Mehrfamilienhaus-Villa und G14 – Mehrfamilienhaus in offener Blockrandbebauung in Form von Gebäude-

verbunden bestehend aus zwei oder drei Segmenten aus der Kategorie G12 heraus genommen. Eine Typisierung von Gebäuden mit G13 hat bisher jedoch noch nicht stattgefunden. Unter G3 wurden die Doppelhäuser der Ein- und Zweifamilienhäuser aus der Kategorie G31 herausgelöst und separat als G34 geführt. Weitere Ausdifferenzierungen der Typen sind geplant, waren jedoch zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung noch nicht umgesetzt. Jedes Gebäudepolygon wurde gemäß dieser Nomenklatur durch das Programm vollautomatisch typisiert. Da es sich um ein System in der Entwicklungsphase handelt, war es erforderlich, das Ergebnis dieser vollautomatischen Klassifikation anhand eines für die gesamte Modellregion als Web Mapping Service (WMS) vorliegenden Luftbildes visuell zu prüfen. Dabei wurden Fehlklassifikationen festgestellt. Ein Teil dieser Fehlklassifikationen wurde korrigiert und diente als Trainingsdatensatz für einen neuen Rechenlauf. Dieser wurde anschließend erneut geprüft. Es erwies sich die Notwendigkeit, diese Arbeitsschritte mehrfach durchzuführen, um die Klassifikationsgüte der Gebäudepolygone schrittweise zu erhöhen und eine vertretbare Ergebnisqualität zu erzielen.

Durch Unterlagerung mit den ATKIS-Blöcken der Siedlungs-Layer der Objektarten 2111, 2112, 2113, 2114 und 2202 wurden diese im Anschluss unter Berücksichtigung der Nutzungsart sowie des in ihnen überwiegend vorkommenden Gebäudetyps nach der in Tabelle 3 aufgeführten Typologie klassifiziert. Die Abgrenzung der ATKIS-Blöcke wird generell beibehalten.

Tabelle 3: Baublocktypologie

Baublocktypologie (implementiert)					Geplante weiterführende Differenzierung (keine Implementierung)
Level 1		Level 2			Level 3
Code	Bezeichnung	Code	Kurzbez.	Bezeichnung	Bezeichnung
B1	Blockstrukturen	B11	G-B	Geschlossene Blockbebauung	Traditionell kompakt-geschlossen
					Traditionell fragmentarisch
					Blockstrukturen überformt
		B12	O-B	Offene Blockbebauung	Traditionell kompakt-offen
					Neubau – kompakt
					Stadtvillen (Blockstrukturen mit geringer Dichte)
B2	Offene Baustrukturen	B21	ZT-B	Zeilenbebauung (traditionell)	Zeile (Reformwohnungsbau)
					Zeile ab 50-er Jahre
		B22	ZI-B	Zeilenbebauung (industriell)	Hofbildende Zeilen
					Mäander
		B23	HH-B	Hochhausbebauung (>50m)	Hochhaus-Scheibe
					Punkt-Hochhäuser

B3	Ein-, Zweifamilien- und Reihenhäuser	B31	EZFH-B	Ein- und Zweifamilienhausbebauung	Ein- und Zwei-FH-Bebauung geringer Dichte
					Verdichtete freistehende Ein- und Zwei-FH-Bebauung
		B32	RH-B	Reihenhausbebauung	Reihenhausbebauung
		B33	DH-B	Dörflich Traditionelle Bauweise	Traditionell dörflich geringe Dichte
				Traditionell dörflich verdichtet	
				Streusiedlung	
B4	Nichtwohnnutzung	B41	IG-B	Industrie/Gewerbe	Gewerbliche Flächen
		B42	BFP-B	Besondere funktionale Prägung (Verwaltung, Gesundheit/Soziales, Bildung/Forschung, Kultur usw.)	Sonstige Nichtwohnnutzung (Brachen, öffentliche Gebäude, Wald, Weg)

Auch bei dieser Typologie ist zu beachten, dass in SEMENTA[®] 2.0 der Baublocktyp mit Doppelhäusern der Ein- und Zweifamilienhausbebauung aus dem Baublocktyp B31 herausgelöst ist und als B34 eigenständig geführt wird. Blöcke, die überwiegend mit dem neuen Gebäudetyp G14 bestanden sind, werden weiterhin unter dem Baublocktyp B12 geführt.

Zur Modifizierung der bestehenden Blockkarte und Stadtstrukturtypenkarte der Stadt Dresden entwarf die Stadtverwaltung Dresden in Zusammenarbeit mit dem IÖR ein Konzept, wie diese Karte von mehreren Ämtern der Stadtverwaltung auf verschiedenen Maßstabsebenen genutzt werden könnte. Ausgehend von einer sogenannten **Basisblockkarte** mit 16 Strukturtypen wurde im Projekt die „**Erweiterte Blockkarte**“ erstellt. Die Erweiterte Blockkarte differenziert auf einer zweiten Ebene in 46 Nutzungsarten und auf einer dritten Ebene in 69 sogenannte „Differenzierte Nutzungsarten“, so dass Auswertungen und Visualisierungen in unterschiedlichen Maßstäben möglich sind. Damit werden noch detailliertere strukturbasierte Aussagen möglich. Grundlage der „Erweiterten Blockkarte“ ist die Basisblockkarte (1. Ebene). Sie beinhaltet Nettoblöcke, d.h. Straßen und Wege sind nicht Bestandteil des Blocks. Diese Basisblockkarte wurde hinsichtlich des Strukturtyps bereits vorklassifiziert vom Stadtvermessungsamt zur Verfügung gestellt. Die Vorklassifikation wurde anhand eines aktuellen Luftbildes mittels manueller Interpretation validiert und ggf. korrigiert. Das Attribut „Versiegelungsgrad“ wurde in Form von Klassen (0, 1, 2, 3, 4, 5) in 20-Prozent-Intervallen angegeben, wobei der Schlüssel „0“ für unversiegelte Flächen steht, während der Schlüssel „5“ den Bereich von 80 Prozent versiegelt bis vollversiegelt bezeichnet. Da Nettoblöcke abgegrenzt sind, ist der Versiegelungsgrad unabhängig von der Versiegelung umliegender Verkehrsflächen und damit eindeutig dem Strukturtyp des Blockes zuzuordnen. Zur Gewährleistung der Anschlussfähigkeit an die früheren Stadtstrukturtypkartierungen wurde der frühere Kartierschlüssel als Attribut beigefügt.

Während der Bearbeitung zeigte sich, dass Stadtplanungsamt und Umweltamt bestimmte Begriffe unterschiedlich definieren, was eine sinnvolle Verwendung der Erweiterten Blockkarte -insbesondere hinsichtlich stadtökologischer Auswertungen- fraglich erscheinen ließ. Aufgrund dessen wurde entschieden, jeweils zwei Versionen der Basisblockkarte sowie der Erweiterten Blockkarte zu erarbeiten. Im weiteren Verlauf des Projektes wird die Version „Umweltamt“ genutzt werden.

Nachdem die Basisblockkarte geprüft und mit den Attributen Versiegelungsgrad und dem entsprechenden Strukturtyp der alten Stadtstrukturtypenkartierung versehen war, wurden die Basisblöcke nach Nutzungsmischungen hinsichtlich der Differenzierten Nutzungsarten von Ebene 3 geprüft. Sind innerhalb eines Basisblockes im aktuellen Luftbild Differenzierungen nach den „Differenzierten Nutzungsarten“ der Ebene 3 erkennbar, so wurden diese durch Trennlinien separiert. Diese Trennlinien wurden zunächst separat angelegt und nach Abschluss der Durchmusterung endgültig in die Basisblöcke eingefügt. Die entstehenden Blöcke bildeten die Blöcke der Ebene 3 der Erweiterten Blockkarte. Anschließend wurden sie hinsichtlich „Differenzierter Nutzungsart“, Versiegelungsgrad und entsprechendem Strukturtyp der alten Stadtstrukturtypenkartierung bewertet. Die Datensätze der Ebene 2, der die Nomenklatur nach Nutzungsart zu Grunde liegt, wurden aus den Blöcken der Ebene 3 aggregiert.

Durch zusätzliche Arbeitsschritte und hohen Abstimmungsbedarf zwischen den Verwaltungsämtern und der Forschung erwies sich die Erstellung der Erweiterten Blockkarte als ein wesentlich arbeits- und zeitaufwändigerer Prozess als in der Projektplanung vorgesehen. Diese Gründe und der erhöhte Aufwand zur Erstellung der Strukturtypenkartierung für die gesamte Modellregion mittels SEMENTA[®] 2.0 sind wesentliche Ursachen für die Verzögerungen im Arbeitsablauf des Arbeitspaketes 3.1.2 e.

Die Projektion der Flächennutzung der Stadt Dresden in das Jahr 2020 erfolgte auf Grundlage des Vorentwurfs zum neuen Flächennutzungsplan mit Stand November 2009. Es standen die GIS-Datensätze des Hauptplans und der 19 Beipläne zur Verfügung. Von besonderem Interesse waren die Beipläne „Wohnen“, „Arbeiten“, „Verkehr“ sowie „Grün- und Freiraumstruktur“. Die Polygone, welche als Entwicklungspotenziale für Wohnbauflächen mit hoher und geringer Wohndichte, gemischte Bauflächen mit und ohne Zentrumsfunktion, gewerbliche Bauflächen, Sonderbauflächen, Gemeinbedarfsflächen, Bahnflächen, Ver- und Entsorgungsanlagen ausgewiesen sind sowie Flächen für geplante P+R-Plätze, Entsiegelungsflächen und Nutzungsänderungen im Freiraum, wurden aus den Beiplänen extrahiert. In einem weiteren Schritt erfolgte der Abgleich der Flächen mit der Erweiterten Blockkarte der Version „Umweltamt“ (Ebene 3) und eine Einarbeitung aller Flächenänderungen. Außerdem wurde das Attribut Versiegelungsgrad der betroffenen Flächen in der Erweiterten Blockkarte angepasst. Ergänzende Angaben des Stadtplanungsamtes zur Art und Dichte der Bebauung unterstützten diesen Vorgang. Unter der Annahme, dass alle geplanten Maßnahmen realisiert werden, entstand dadurch eine Erweiterte Blockkarte des Jahres 2020. Sie bildet nunmehr die Grundlage für Hochrechnungen block- und nutzungsartenspezifischer Attribute und damit zur Bestimmung struktureller Kennzahlen für die Stadt Dresden im Jahr 2020 (z.B. Versiegelungsgrad).

4. Ergebnisse

Auf Grundlage räumlicher Analysen wurden aus dem normierten Digitalen Oberflächenmodell (nDOM) die **Gebäudehöhen der Gebäude der DSK** ermittelt. Die Ausweisung erfolgte als Mittelwert der Höhenpunkte eines Gebäudes bzw. Gebäudeteils. Der Datensatz der Gebäude einschließlich ihrer mittleren Höhen ist wichtiger Input für die meteorologische Modellierung, beispielsweise zur Simulation der Strahlungsverhältnisse.

Im vorliegenden Arbeitspaket erfolgte die **Qualifizierung der IÖR-Projektbiotop-typenkarte** bzw. Stadtvegetationsstrukturtypenkarte. Die im genannten IÖR-Vorgängerprojekt untersuchten Repräsentanten der einzelnen Projektbiotoptypen wurden mit der Abwasserkarte verschnitten und damit mit ihren differenzierten Bodendeckschichten überlagert. Für alle Repräsentanten der IÖR-Projektbiotoptypen wurden somit **zusätzlich** zu den Kenngrößen Grünflächenanteil und Grünvolumen die **Kenngrößen Versiegelungsgrad, Abflussbeiwert, Vernetzungsgrad und Überbauungsgrad** ermittelt. Über Plausibilitätskontrolle und Mittelwertbildung wurden somit jedem Projektbiototyp diese Kenngrößen in Form von Mittelwerten zugeordnet. Auch dieser Datensatz ist wichtiger Input für die meteorologische Modellierung.

Zur Ermittlung der Grünausstattung der baulichen Strukturen erfolgte die **Verschneidung der IÖR-Projektbiotoptypenkarte mit der Karte der statistischen Blöcke**. Somit konnte die Grünausstattung der statistischen Blöcke über die Attribute der IÖR-Projektbiotoptypenkarte ermittelt werden. Damit sind Aussagen zur Grünausstattung von den in der Blockkarte geführten städtebaulichen Strukturen möglich (Teilprojekt 3.1.2e).

Durch **Verschneidung von IÖR-Projektbiotoptypen mit der sachsenweiten Biotoptypen- und Landnutzungskartierung** erfolgte die Prüfung der Übertragbarkeit der Kenngrößen der IÖR-Projektbiotoptypenkarte auf die gesamte Modellregion. Anhand der Ausprägungen und Strukturmerkmale wurde eine Transformationstabelle zwischen IÖR-Projektbiotoptypenkarte und sachsenweiter BTLNK geschaffen. Durch Verschneidung mit einem für die gesamte Modellregion vorliegenden Strukturtypendatensatz ist somit eine Ermittlung der strukturbezogenen Grünausstattung möglich.

Der für die gesamte Modellregion vorliegende **Strukturtypendatensatz** wurde **mittels SEMENTA® 2.0** gemäß oben genannter Nomenklaturen ermittelt. Als Inputdatensätze dienten der Layer der Objektart 2315 „Gebäude“ für die Modellregion sowie die Layer der Objektarten der sogenannten Grundflächen des ATKIS-Basis-DLM. SEMENTA® 2.0 befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Es war daher notwendig, das Programmsystem mit Hilfe von Trainingsdaten aus der Modellregion „anzulernen“. Dies erfolgte in einem aufwändigen mehrstufigen, sequentiellen Verfahren von Berechnung, Validierung des Berechnungsergebnisses, Korrektur eines Teils der fehlklassifizierten Gebäude und Neuberechnung. Der nun vorliegende Datensatz erfüllt Mindestanforderungen an die Klassifikationsgüte, ist jedoch nicht flächendeckend optimal. Eine weitere Qualifizierung ist aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Dieser Datensatz dient nunmehr dazu, strukturbasierte Aussagen zur Grünausstattung für die gesamte Modellregion treffen zu können (Produkt 3.1.2 e). Weitere Arbeiten im Verlauf des Arbeitspakets 3.1.2 a umfassten die Modifizierung der Blockkarte bzw. Stadtstrukturtypenkarte der Stadt Dresden. Ausgehend von einer sogenannten Basisblockkarte mit 16 Strukturtypen wurde die „**Erweiterte Blockkarte**“ erstellt. Auf der zweiten Ebene wurde in 46 Nutzungsarten und auf der dritten Ebene in 69 „Differenzierte Nutzungsarten“ weiter gegliedert. Damit werden noch detailliertere strukturbasierte Aussagen möglich. Das Ergebnis wird in mehreren Ämtern der Stadtverwaltung Dresden genutzt. Aufgrund unterschiedlicher Definitionen bestimmter Begriffe im Stadtplanungsamt und Umweltamt war es nötig, jeweils zwei getrennte Versionen der Erweiterten Blockkarte in allen drei Ebenen zu erstellen. Mit der Version „Umweltamt“ sind stadttökologische Untersuchungen wesentlich besser möglich. Die Anschlussfähigkeit an die alte Stadtstrukturtypenkarte wurde ebenfalls gewährleistet. Die Erweiterte Blockkarte wurde zudem innerhalb des Projektes REGKLAM

bereits an andere Teilprojekte weitergegeben, z.B. zur Bestimmung des Versiegelungsgrades für hydrologische Modellierungen.

Die GIS-Datensätze von Hauptplan und Beiplänen des Vorentwurfs zum neuen **Flächennutzungsplan** der Stadt Dresden dienten im Teilprojekt 3.1.2 a u.a. der Projektion der Flächennutzung der Stadt Dresden ins Jahr 2020. Die Projektion der Flächennutzung erfolgte in der Form, dass die Informationen aus Hauptplan und den Beiplänen des Vorentwurfs des Flächennutzungsplans in den Datensatz der dritten Ebene der Erweiterten Blockkarte eingearbeitet wurden, so dass praktisch eine Erweiterte Blockkarte der Stadt Dresden im Jahr 2020 erstellt wurde, unter der Annahme, dass alle geplanten Maßnahmen umgesetzt werden.

5. Weiterführende Literatur

- ADV (2003): ATKIS-Objektartenkatalog (ATKIS-OK). Teil D1. Version 3.2 Stand 01.07.2003. Teilkatalog Basis-DLM. Onlinedokument (Zugriff 13.07.2010):
http://www.geodatenzentrum.de/docpdf/ok_d1.pdf
- ARLT, G.; HENNERSDORF, J.; LEHMANN, I.; THINH, N. X.; SOCHER, W. (2003): Basisindikator Vegetationsvolumen - Vorgehensweise und Fallbetrachtung in Dresden. In: Stadtforschung und Statistik (2003) 2, S.38-45
- ARLT, G.; HENNERSDORF, J.; LEHMANN, I.; THINH, N. X. (2005): Auswirkungen städtischer Nutzungsstrukturen auf Grünflächen und Grünvolumen Dresden : IÖR, 2005, S.136. (IÖR-Schriften; 47)
- HENNERSDORF, J.; MEINEL, G. (2007): Fortschreibung der Stadtstrukturtypenkarte der Stadt Dresden auf Basis von Ortholuftbilddaten der Jahre 2005/2006. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvertrag. Dresden. Unveröffentlicht.
- HERBERG, A. ET. AL. (2008): Antrag des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung e.V. (IÖR) zum Gesamtantrag von IÖR-TUD-TU BAF-DGFZ-Ift-LHD-SEDD auf Projektförderung im Rahmen der Förderinitiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG) Regionen gewinnen im Wettbewerb - die Welt gewinnt mit! in der Bekanntmachung vom 14.03.2007. Dresden, 2008
- MEINEL, G.; HECHT, R.; HEROLD, H.; SCHILLER, G. (2008). Automatische Ableitung von stadtstrukturellen Grundlagendaten und Integration in einem Geographischen Informationssystem. Bonn. (Forschungen / BBR; 134)
- MEINEL, G.; HECHT, R.; SOCHER, W. (2006): Städtisches Grünvolumen - neuer Basisindikator für die Stadtökologie? Bestimmungsmethodik und Ergebnisbewertung. In: CORP 2006 - Computergestützte Raumplanung. Tagungsband. Wien : Institut für EDV-gestützte Methoden in Architektur und Raumplanung, 2006, S.685-694
- MEINEL, G.; HERNIG, A. (2006): Erhebung der Bodenversiegelung auf Grundlage des ATKIS-Basis-DLM - Möglichkeiten und Grenzen. In: Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (2006) 3, S.195-204

RÖBLER, S.; BRÄUER, A.; GOLDBERG, V.; LEHMANN, I.; MATHEY, J. (2010): Grün ist nicht gleich grün. Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt am IÖR in Dresden. In: Garten + Landschaft 120 (2010) 4, S.16-19

Teil B: Thermale Charakterisierung von Stadtstrukturen – Satellitengestützte Analyse von Oberflächentemperaturen

1. Einleitung

Seit der Verfügbarkeit von großflächigen Thermalscannerdaten wurden in zahlreichen Studien städtische Wärmeinseln untersucht. Dabei werden aus Aufnahmen im thermischen Fenster des elektromagnetischen Spektrums Temperaturen abgeleitet. Im Rahmen des REGKLAM-Teilprojektes 3.1.2 wurden bestehende Methoden zur Ableitung von Oberflächentemperaturen aus Fernerkundungsdaten angepasst und um neue Ansätze ergänzt. Dadurch wurde eine Grundlage zur Bewertung der klimatischen Situation im Stadtgebiet geschaffen.

Im Bereich der Thermographie im Allgemeinen und Thermalfernerkundung im Besonderen wird Strahlung im Bereich des thermischen Infrarots (TIR) registriert. Dieser erstreckt am langwelligen Rand des Infrarots im Intervall von ca. 8–12 μm . Um den Wärmeeffekt von Städten als Ganzes gegenüber der Umgebung im Maßstab abzubilden, genügen Satellitendaten mit relativ grober Auflösung. Um innerstädtische Bereiche mit unterschiedlichen thermalen Eigenschaften zu differenzieren, sind hochauflösende Sensoren nötig.

Meteorologische Satelliten zeichnen sich durch eine hohe Wiederholfrequenz der beobachteten Gebiete aus, wobei die räumliche Auflösung (den Erfordernissen meteorologischer Beobachtungen gemäß) gering bleibt.

Meteosat 9, der von der europäischen Organisation EUMETSAT betrieben wird, ist geostationär in 36.000 km Höhe positioniert und ermöglicht durch einen Aufnahmekanal im thermischen Infrarot (10,5–12,5 μm) die kontinuierliche Bestimmung von Wolken-, Land- und Meerestemperaturen. Die Pixelgröße im Zentrum des Bildes beträgt ca. 3x3 km (http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_menu2_wetterlexikon&_nfls=false).

Das Instrument *Advanced Very High Resolution Radiometer* Version 3 (AVHRR/3) ist auf der Plattform NOAA-15 installiert und weist zwei thermische Kanäle mit den Wellenlängenbereichen 10,3–11,3 μm und 11,5–12,5 μm auf (<http://www.noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>). Die räumliche Auflösung der Instrumente der AVHRR-Sensoren beträgt ca. 1 km pro Pixel.

VOOGT & OKE (2003) führen Studien auf, in denen die städtische Wärmeinsel mittels Satellitendaten untersucht wurde, wobei neben AVHRR vorrangig Landsat Thematic Mapper (Landsat-TM) verwendet wurden.

Der *Thematic Mapper* an Bord der Satelliten Landsat 4 und Landsat 5 hat einen Thermalkanal mit der zentralen Wellenlänge 11,4 μm , wobei die räumliche Auflösung 120 m beträgt. Die neuere Version des Sensors *Enhanced Thematic Mapper +* (ETM+) auf Landsat 7 zeichnet bei 11,3 μm auf und bietet eine Auflösung von 60 m. Die Multispektralkanäle von TM und ETM+ im sichtbaren und nahen Infrarotspektrum lösen jeweils mit der halben Pixelbreite auf.

An Bord des Satelliten Terra befindet sich das in Japan entwickelte *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), das in insgesamt 14 Kanälen aufzeichnet, fünf davon im thermalen Infrarot. Die Auflösung bei ASTER variiert je nach Auf-

nahmeeinheit: 15 m im sichtbaren und nahinfraroten Spektrum, 30 m im kurzwelligen Infrarot und 90 m im langwelligen/thermischen Infrarot.

Tabelle 4: Wichtige Satellitenplattformen mit Thermalsensoren

Satellit	Sensor	Orbit	Wiederholrate	Thermalkanäle	Bandbreite [µm]	Auflösung [m]
Meteosat 9 (Europa)		36000 km, geostationär	15 min	1	10,5–14,5	3000
NOAA-15/19 (USA)	AVHRR/3	830–870 km, polar sonnen-synchron	12 h	2	10,3–12,5	1000
Landsat 4/5 (USA)	TM		16 d	1	10,4–12,5	120
Terra (Japan/USA)	ASTER	ca. 700 km, polar sonnen-synchron	16 d	5	8,1–11,7	90
Landsat 7 (USA)	ETM+		16 d	1	10,4–12,5	60

2. Datengrundlagen

2.1 Datenrecherche und Beschaffung für das Teilprojekt

Für die Verwendung im REGKLAM-Teilprojekt 3.1.2 kommen aufgrund der räumlichen Auflösung nur Daten der Landsat- und Terra-Satelliten in Frage, wobei auch die hier gebotenen Pixelgrößen von 60 bzw. 120 m keine höchstauflösenden Analysen erlauben, da es sich stets um Mischpixel handeln wird. Dennoch kann aus diesen Daten die Ableitung wesentlicher Information für die Stadtklimaanalyse erwartet werden.

2.1.1 Landsat

Vorrangig zu verwendende Aufnahmen sind die Landsatdaten, da diese von der NASA kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Die Recherche der Daten ist über ein Internetportal möglich, wobei gezielt nach Aufnahmen aus bestimmten Zeiträumen gesucht werden kann. Daten, die nicht zum sofortigen Download verfügbar sind, können angefordert werden und stehen innerhalb weniger Tage zur Verfügung. Landsatdaten werden in Form von Paketen abgegeben, die für jedes Band eine TIFF-Datei enthält, die 8-Bit-kodierte Integerwerte enthält.

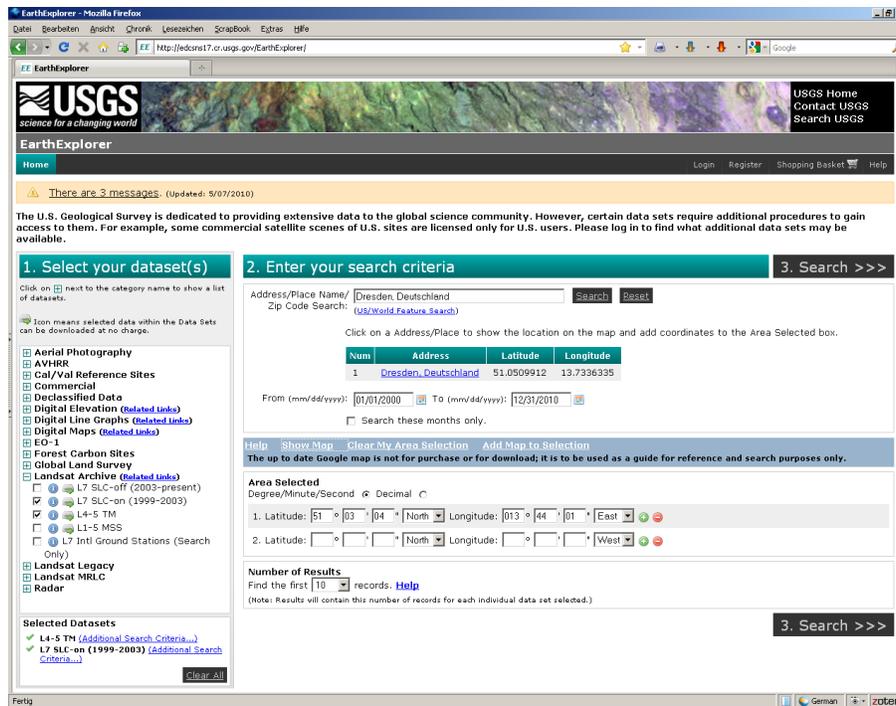


Abbildung 1: Earth Explorer: Recherche von Satellitendaten (United States Geological Survey, <http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>)

2.1.2 ASTER

Ergänzend waren ASTER-Daten zu verwenden, um Informationen zur Emissivität der Erdoberfläche zu gewinnen, die für eine Ableitung von Oberflächentemperaturen aus Landsatdaten zu nötig sind. ASTER-Daten werden in Form verschiedener Produkte durch das japanische *Earth Remote Sensing Data Analysis Center* (ERSDAC, <http://www.ersdac.or.jp/>) in Tokio vertrieben.

Tabelle 5: ASTER-Standard- und Semi-Standardprodukte (Quelle: <http://www.gds.aster.ersdac.or.jp/gds>)

Code	Name	Sensor	Ground Resolution	Beschaffung für TP
Level 1 A	Level 1 A	V1,V2,S,T	V1(15m), V2(15m),S(30m), T(90m)	
Level 1 B	Level 1 B	V1,V2,S,T	V1(15m), V2(15m),S(30m), T(90m)	
2B01V	Earth Surface Radiance VNIR	V	15m	
2B01S	Earth Surface Radiance SWIR	S	30m	
2B01T	Earth Surface Radiance TIR	T	90m	
2B03	Earth Surface Temperature	T	<>90m	
2B04	Earth Surface Emissivity	T	90m	Ja
2B05V	Earth Surface Reflectance VNIR	V	15m	
2B05S	Earth Surface Reflectance SWIR	S	30m	
3A01	Terrain Correction Image	V1,V2,S,T	V(15m),S(30m),T(90m)	Ja
4A01	Relativity DEM XYZ	V2	30m	
4A01	Relativity DEM Z	V2	30m	

Aufgrund der Zahl von fünf Thermalkanälen ist es möglich, die Emissivität durch Anwendung verschiedener Verfahren zu bestimmen (Dash et al., 2002). Im Produkt 2B04 *Earth Surface Emissivity* wird diese für alle Thermalkanäle getrennt angegeben.

ASTER-Produkte sind kostenpflichtig und über ERSDAC im Internet zu recherchieren und zu erwerben.

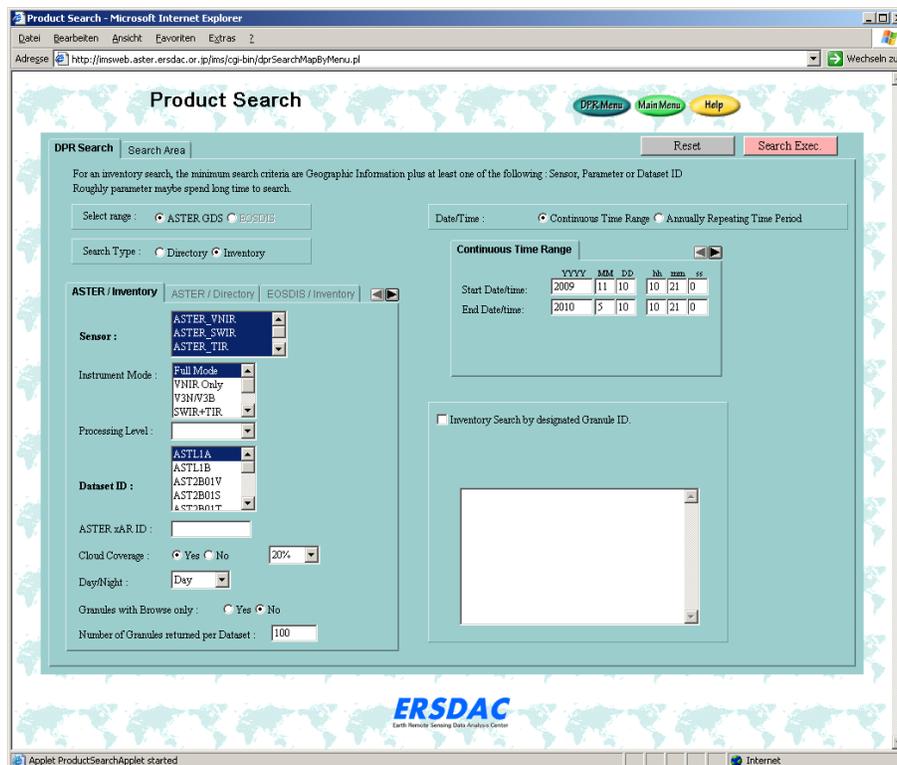


Abbildung 2: Portal zur Recherche und Bestellung von ASTER-Daten (<http://imsweb.aster.ersdac.or.jp/ims/cgi-bin/dprSearchMapByMenu.pl>)

2.2 Abdeckung der Modellregion mit Satellitendaten

2.2.1 Abdeckung durch Landsat-TM/ETM+

Landsat-Daten werden im Landsat Worldwide Reference System lokalisiert. Dieses ist in Spalten (*paths*) und Reihen (*rows*) gegliedert. Ein Path entspricht dabei einer Überflugbahn in Nord-Süd-Richtung, wobei zwischen *ascending* und *descending mode* unterschieden wird. Die Nord-Süd-gerichteten Aufnahmestreifen werden mit Überlappung in *rows* unterteilt und als Einzelszenen abgegeben. Benachbarte Szenen innerhalb eines Streifens können nahtlos zusammengefügt werden, da diese in derselben Überflugphase entstanden sind. Benachbarte Streifen werden jedoch mit einem zeitlichen Versatz aufgezeichnet, so dass eine Mosaikierung in ost-westlicher Richtung Probleme bereiten kann.

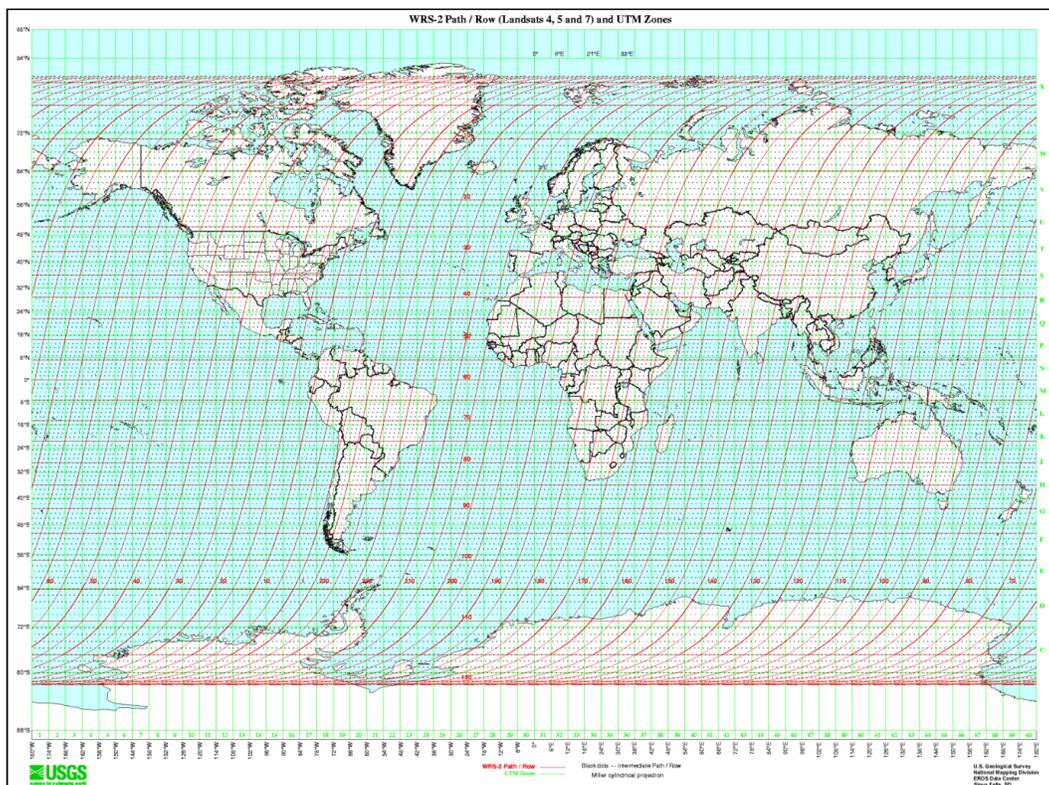


Abbildung 3: Landsat Worldwide Reference System (WRS, Quelle: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/wrs2.gif>)

Die REGKLAM-Region und die Stadt Dresden befinden sich bezüglich dieses Systems im Überlappungsbereich mehrerer Spalten und Reihen sowohl bei Tages- als auch bei Nachtüberflüge (s. Abbildung 4). Daher ist es nicht möglich, das gesamte Modellgebiet mit einer einzelnen Szene abzudecken, so dass entweder nur ein Teilraum betrachtet werden kann oder es nötig ist, benachbarte tagesgleiche Aufnahmen eines Aufnahmepfades zu akquirieren, sofern diese verfügbar sind.

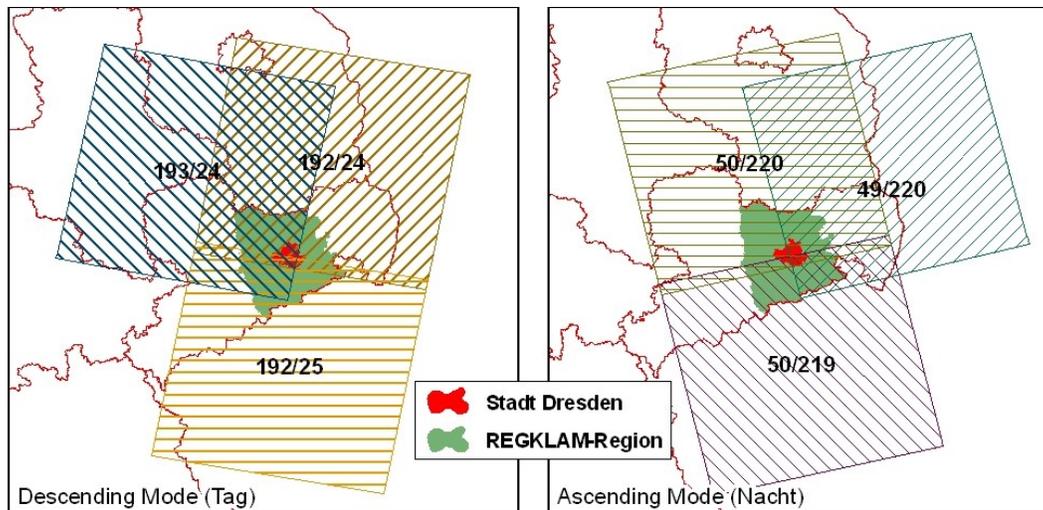


Abbildung 4: Abdeckung der REGKLAM-Modellregion im WRS-2 (Landsat-Kacheln)

2.2.2 Abdeckung durch Terra-ASTER

Die ASTER-Daten bedecken ein kleineres Gebiet und werden über Granule-IDs referenziert. Eine Szene deckt eine Fläche von ca. 60x60 km ab.

Tabelle 6: Ausgewertete Satellitendaten

Datum	Scene-ID (Granule-ID)	Platform	Sensor	Path	Row	Day/Night	GMT
20.6.2000	LE71920252000172EDC00	Landsat 7	ETM+	192	25	D	09:49
	LE71920242000172EDC00				24		
13.8.2000	LE70492202000226EDC00	Landsat 7	ETM+	49	220	N	20:22
28.7.2002	LE71920252002209EDC00	Landsat 7	ETM+	192	25	D	09:45
	LE71920242002209EDC00				24		
19.8.2002	LE70492202002231EDC00	Landsat 7	ETM+	49	220	N	20:19
30.5.2004	0405301014240406000000	Terra	ASTER			D	10:14
10.9.2004	0409101019550409220446	Terra	ASTER			D	10:19
13.6.2006	LT51920252006164KIS00	Landsat 5	TM	192	25	D	09:50
	LT51920242006164KIS00				24		
22.7.2006	LT51930242006203KIS01	Landsat 5	TM	193	24	D	09:56
	LT51930252006203KIS01				25		

Für den Zeitraum 2000–2006 konnten durch die Kombination von benachbarten Landsat-Szenen jeweils zwei nahezu wolkenfreie und das gesamte Modellgebiet abdeckende Datensätze für heiße Tage ($T_{\max} > 30 \text{ °C}$) und Sommertage ($T_{\max} > 25 \text{ °C}$) Satellitenszenen bereitgestellt werden. Für die Nachtaufnahmen (bzw. später Abend) stand jeweils nur eine Kachel zur Verfügung, womit nur die Abdeckung des östlichen Teils des Untersuchungsgebiets gewährleistet war.

Es wurden weiterhin für zwei Aufnahmezeitpunkte (30.5.2004 und 10.9.2004) ASTER-Emissivitätsdatensätze und, um diese georeferenzieren zu können, die dazugehörigen ASTER-Orthobilder beschafft.

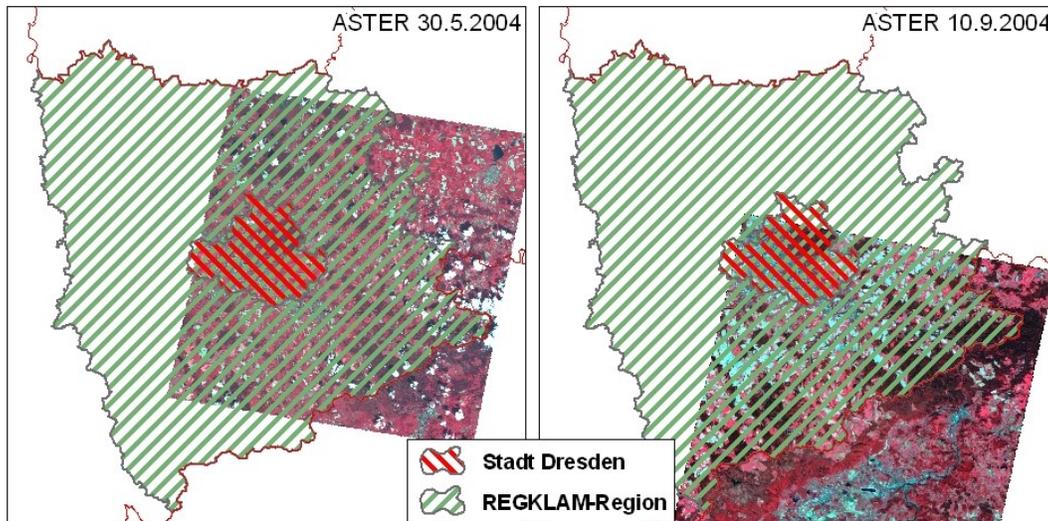


Abbildung 5: Abdeckung des Modellgebiets mit ASTER-Daten

3. Methoden der Satellitendatenauswertung

3.1 Methodik zur Verarbeitung der Landsatdaten

Satellitengestützte Thermalscanner registrieren berührungsfrei und flächendeckend für größere Gebiete die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung. Die gemessenen Strahlungswerte werden üblicherweise in ganzzahlige Werte konvertiert und in Form eines Grauertrasters abgelegt. Je nach Quantisierung werden dabei Integerwerte in unterschiedlichen Intervallen belegt (z. B. [0..255] bei 8 Bit, [0..4095] bei 12 Bit).

Die Ableitung von Oberflächentemperaturen aus den Daten erfordert ein schrittweises Vorgehen. Zunächst müssen die gespeicherten Integerwerte in Strahlungswerte rücktransformiert und diese in Temperaturen umgerechnet werden. Zu beachten dabei ist der Atmosphäreneinfluss, der den gemessenen Größen innewohnt und durch Bildkorrekturen möglichst eliminiert werden sollte.

3.1.1 Radiometrische Kalibrierung

Im ersten Schritt waren die quantisierten 8-Bit-Integerwerte (Digital Numbers, DN) in spektrale Radianzen L_λ (Strahlungswerte) zu konvertieren, was durch die Band-spezifischen Kalibrierungsfaktoren G (Gain) und B (Bias) realisiert wird:

$$L_\lambda = G DN + B$$

Es handelt sich dabei um atmosphärisch beeinflusste Strahlungswerte, die auch als *at-sensor spectral radiance* bezeichnet werden. Die gemessene Strahlung in den Aufnahmekanälen im sichtbaren und nahinfraroten Spektrum (Band 1–5, Band 7) ist abhängig vom Zenitwinkel θ_S der Sonne, vom Abstand d der Sonne zur Erde (Einheit: [AE]) und von der mittleren atmosphären Bestrahlungsstärke $ESUN_\lambda$ im jeweiligen Wellenlängenbereich. Die Radianz kann durch folgende Formel in die planetare Reflektanz ρ_S (Albedo, ohne Einheit) umgerechnet werden:

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda d^2}{ESUN_\lambda \cos \theta_S}$$

Die Umrechnung in die planetare Reflektanz ermöglicht die Vergleichbarkeit von benachbarten Szenen, da die Effekte eliminiert werden, die durch den unterschiedlichen Stand der Sonne zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten hervorgerufen werden. Allerdings sind auch diese Werte noch immer durch die Atmosphäre beeinflusst. Man spricht daher auch von *top-of-atmosphere reflectance* im Gegensatz zur Oberflächenreflektanz (-albedo) bzw. *surface reflectance*, für deren Bestimmung eine Atmosphärenkorrektur durchzuführen ist.

Mit den Radianzen (*at-sensor spectral radiance*) des Thermalbands von TM/ETM+ (Band 6) kann die aufgezeichnete Strahlung unter Zuhilfenahme der Kalibrationskonstanten $K1$ (Einheit: [$W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$]) und $K2$ (Einheit: [K]), die für alle Landsatsysteme gegeben sind, in Strahlungstemperaturen (Einheit: [K]) umgerechnet werden:

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Atmosphäreneinflüsse und die Emissivität der Oberfläche bleiben dabei unbeachtet, d. h. es handelt sich um die Temperaturen eines Schwarzkörpers ohne Atmosphäre, sog. *at-sensor brightness temperatures*. Zur Ableitung von Erdoberflächentemperaturen (Land surface temperatures, LST) ist eine Atmosphärenkorrektur und die Einrechnung der Emissivität vonnöten. Mit Ausnahme dieser Größen liegen alle Konstanten und Parameter, die für die o. g. Umrechnungen notwendig sind, für jedes Band des TM bzw. ETM+ tabelliert vor (CHANDER ET AL., 2009).

3.1.2 Wolkendetektion

Mit Hilfe der Radianzen der Bänder 1–6 können Wolken in der Landsatszene detektiert und maskiert werden. Der bei IRISH (2008) beschriebene Algorithmus (Automatic Cloud Cover Assessment, ACCA) wurde in ERDAS Imagine umgesetzt. Dadurch können Wolkenpixel bei der Ableitung von Oberflächentemperaturen eliminiert werden.

3.1.3 Atmosphärenkorrektur der Thermaldaten

Die Atmosphärenkorrektur des Thermalbandes wurde entsprechend BARS ET AL. (2003, 2003a) vorgenommen. Die Berechnung der Korrekturparameter erfolgte dementsprechend mit dem *Atmospheric Correction Parameter Calculator*, der im Internet frei verfügbar ist (http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/atm_corr.html). Die nötigen Eingangsdaten zur meteorologischen Situation zum Zeitpunkt der Aufnahme wurden für alle zu korrigierenden Szenen recherchiert, wobei als Referenz stets die DWD-Wetterstation Dresden-Klotzsche gewählt wurde.

Tabelle 7: Relevante Wetterdaten zur Atmosphärenkorrektur des TM/ETM+ Band 6 und Korrekturparameter

Datum	Meteorologische Daten			Atmosphärenkorrekturparameter		
	Druck [hPa]	Tageshöchsttemperatur [°C]	Luftfeuchte [%]	Atmosph. Transmission τ	Upwelling Radiance L_u	Downwelling Radiance L_d
20.6.2000 ^H	1018	31,0 (33,7)	22,0	0,83	1,38	2,31
13.8.2000 ^N	992	23,4 (29,2)	37,2	0,87	1,02	1,72
18.6.2002 ^H	1020	29,0 (31,0)	49,7	0,73	2,28	3,64
28.7.2002 ^S	1022	25,0 (29,5)	41,0	0,84	1,30	2,14
19.8.2002 ^N	1019	22,0 (29,4)	64,0	0,75	1,95	3,11
9.8.2004 ^S	1016	26,0 (28,3)	36,0	0,74	1,91	3,12
13.6.2006 ^S	1024	27,0 (28,8)	28,0	0,85	1,16	1,96
22.5.2007 ^S	1016	26,0 (28,4)	51,0	0,66	2,58	4,11
22.7.2006 ^H	1019	29,0 (32,5)	33,0	0,81	1,56	2,57
28.7.2008 ^H	1019	29,0 (30,9)	33,0	0,84	1,28	2,13

H: Heißer Tag, S: Sommertag, N: Nacht

Mit Hilfe der ermittelten Korrekturparameter kann die am Sensor gemessene Thermalstrahlung um die Atmosphäreinflüsse und die Emissivität korrigiert werden:

$$L_{TOA} = \tau \varepsilon L_T + L_u + (1 - \varepsilon) L_d$$

Alle Schritte zur Bildverarbeitung erfolgten im Spatial Modeler von ERDAS Imagine. In Abbildung 6 ist der Modellaufbau zur Atmosphärenkorrektur und Oberflächentemperaturableitung dargestellt, wobei die Emissivität als konstanter Wert dargestellt ist.

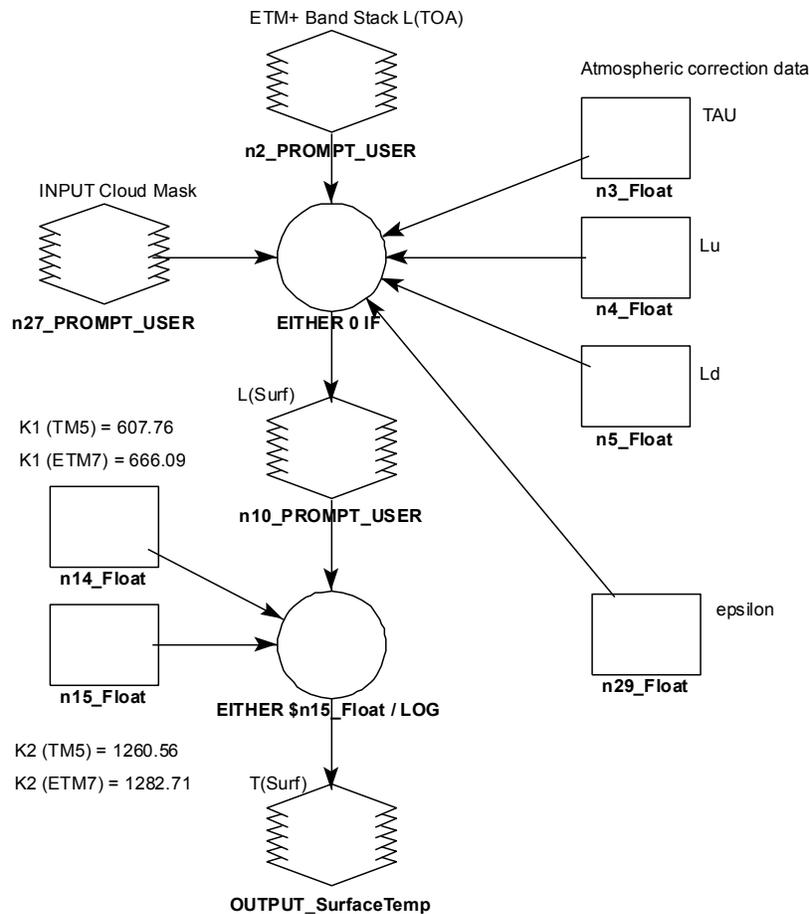


Abbildung 6: Modellablauf zur Ableitung von LST aus Strahlungswerten in ERDAS Imagine (konstantes ϵ)

3.1.4 Problem der Schätzung der Emissivität

In der Literatur werden oft andere Landsat-Aufnahmekanäle als Hilfe zur Abschätzung der Emissivität verwendet. Insbesondere der NDVI, der sehr sensitiv auf Vegetationsmerkmale reagiert, wird dazu herangezogen. Der NDVI (*Normalized Differenced Vegetation Index*) ist der am weitesten verbreitete Vegetationsindex und wird mittels der Reflexionen des roten (R) und nahen infraroten (NIR) Spektrums berechnet:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Dabei existieren zum einen Näherungsformeln, die einen direkten Zusammenhang zwischen NDVI und Emissivität herstellen (s. u. a. VAN DE GRIEND & OWE, 1993; ZHANG ET AL., 2006). Zum anderen dient der NDVI als Diskriminator zur Trennung zwischen Vegetationsflächen und bebauten Flächen, denen dann bestimmte Emissivitäten zugewiesen werden (s. u. NICHOL, 1998; GONG & LI, 2005; STATHOPOULOU, 2007). Wasser wird stets eine Emissivität nahe 1 zugeschrieben.

Tabelle 8: In der Literatur ausgewiesene Emissivitäten für unterschiedliche Flächen

Flächentyp	Emissivität ϵ	Bemerkung
Vegetation	$\epsilon = 0,95.. 0,985$	teilweise als Funktion des NDVI: $\epsilon = \epsilon(\text{NDVI})$
Urban/Nicht-Vegetation	$\epsilon = 0,92.. 0,956$	
Wasser	$\epsilon = 0,97.. 0,99$	meist nur bei konkreter Fragestellung nach Wasseroberflächen-temperaturen gesondert betrachtet

Gemeinsam ist allen Studien, dass die Emissivität mit zunehmender Vegetationsdecke zunimmt. Jedoch lassen sich die funktionalen Zusammenhänge zwischen NDVI und Emissivität zum Großteil nur auf natürliche Oberflächen anwenden. Zum anderen werden sie teilweise nur für bestimmte Wertebereiche des NDVI angegeben (VAN DE GRIEND & OWE, 1993; ZHANG ET AL., 2006). Die Übertragbarkeit auf andere Satellitenszenen ist nur eingeschränkt möglich, da die NDVI-Werte auch von der gewählten Methode zur Atmosphärenkorrektur der roten und infraroten Radianzen beeinflusst werden.

3.2 Emissivitätsanalysen

Die beiden ASTER-Szenen bieten für alle fünf Thermalkanäle die Emissivitäten als Standardprodukt (Produktlevel 2B04) an. Über das ASTER-Orthobild (Produktlevel A301) können die Daten georeferenziert werden. Die Daten werden von der ausgebenden Stelle (ERSDAC Tokio) nach Standardverfahren verarbeitet, was u. U. zu einer gewissen „Streifigkeit“ führen kann. Dieses Problem ist bekannt, es existieren aber derzeit keine Möglichkeiten zur vollständigen Vermeidung des Effekts

(http://www.gds.aster.ersdac.or.jp/gds_www2002/service_e/release_e/set_release_e.html), der am geringsten in dem Emissivitätsband mit den höchsten Werten ausfällt (s. Abbildung 7). Dies ist für die beiden Aufnahmen für TP 3.1.2 jeweils Band 10 mit einer zentralen Wellenlänge von 8,3 μm .

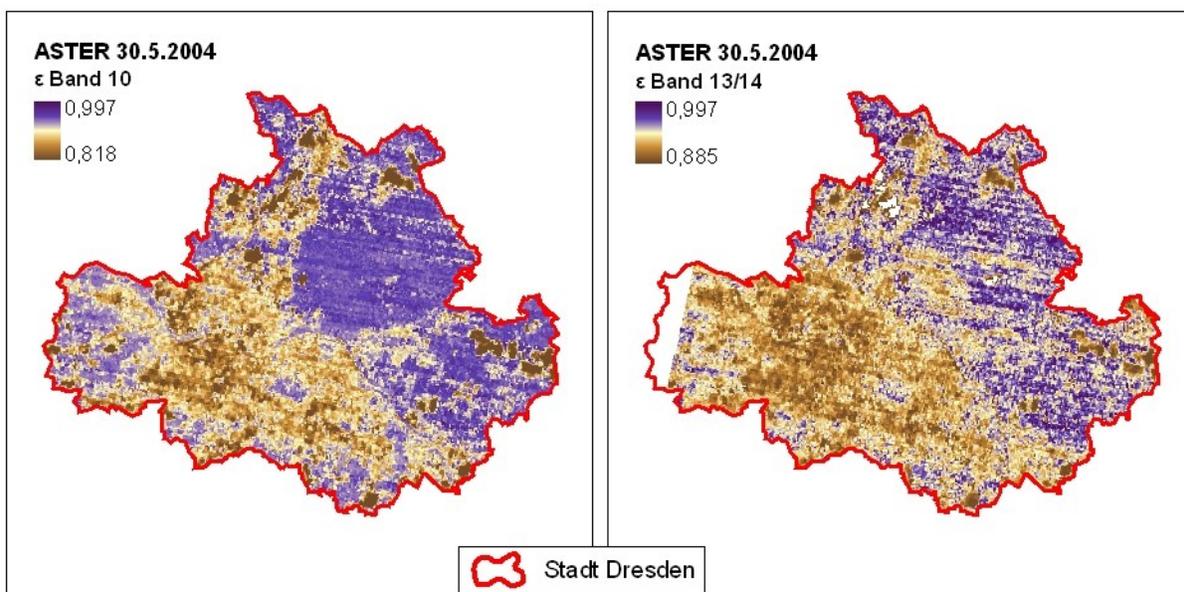


Abbildung 7: Streifeneffekt in ASTER-Daten (Band 10 vs. Band 13/14 gemittelt)

Die Kombination der Bänder 13 und 14 des ASTER (in Summe ca. 10,25–11,65 µm) kommt dem Wellenlängenbereich des Thermalbandes von TM/ETM+ (ca. 10,4–12,5 µm) am nächsten. Daher wurden diese Bänder der georeferenzierten 2B04 -Szene entnommen, gemittelt (s. Abbildung 8) und für die weitere Auswertung herangezogen.

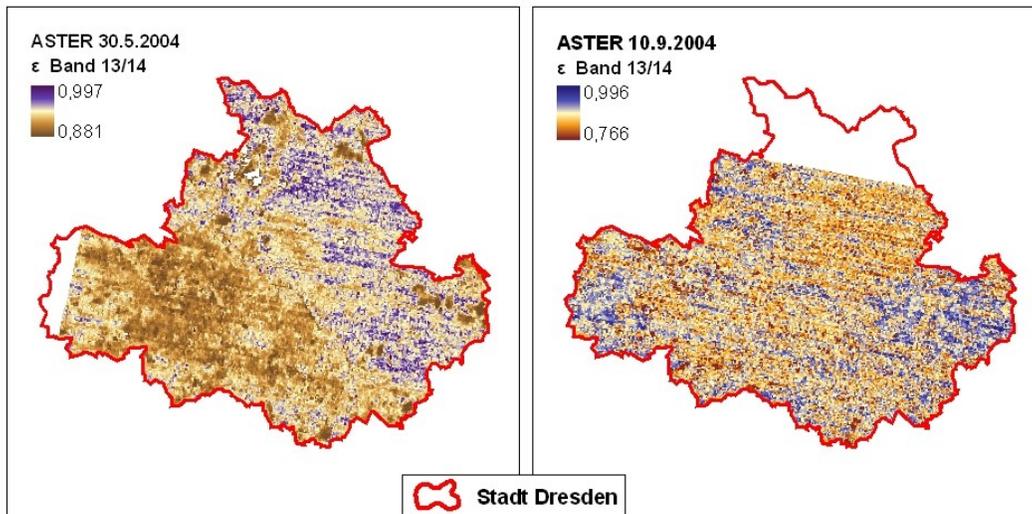


Abbildung 8: Gemittelte Emissivitäten der Bänder 13 und 14 (ASTER)

3.2.1 Zusammenhang NDVI und Emissivität

Es wurde getestet, ob ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Emissivität (ASTER 2B04) und dem NDVI, der sich aus den optischen Aufnahmekanälen von ASTER errechnen lässt, besteht. Zur Berechnung des NDVI wurden zunächst die quantisierten Integerwerte (Digital Numbers, DN) der Kanäle 2 und 3 des ASTER-Orthobildes (3A01) in Radianzen (at-sensor radiances/top-of-atmosphere radiances, L_{TOA}) umgerechnet. Diese Kombination der Spektralkanäle kommt den Landsatbändern 3 und 4 am nächsten, die ebenfalls zur NDVI-Bestimmung verwendet werden können.

Für ASTER geschieht dies unter Zuhilfenahme eines Unit Conversion Coefficient (UUC) mittels der Formel (<http://www.cnrhome.uidaho.edu/default.aspx?pid=85984>):

$$L_{TOA} = (DN - 1) UUC$$

Die benötigten *Unit Conversion Coefficients* liegen tabelliert vor und sind auch aus den Metadaten der ASTER-Daten ersichtlich. Mittels dieser Radianzen konnte ein NDVI bestimmt werden, der sich allerdings nicht auf die Reflektanzen am Boden bezieht, und somit nur einen Näherungswert darstellt (Abbildung 9). Dennoch sind auch hier hohe Werte mit stärker ausgeprägter bzw. gesunder Vegetation verbunden, so dass es möglich ist, auf einen statistischen Zusammenhang zwischen NDVI und Emissivität zu untersuchen.

Die Emissivitäten aus Kanal 10 wurden mit dem NDVI-Bild zu einem Image-Stack und mit ERDAS Imagine auf Korrelation untersucht, wobei nur ein kleiner Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,48 festgestellt werden konnte: Die zugehörige Korrelationsmatrix lautet:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0,48 \\ 0,48 & 1 \end{pmatrix}$$

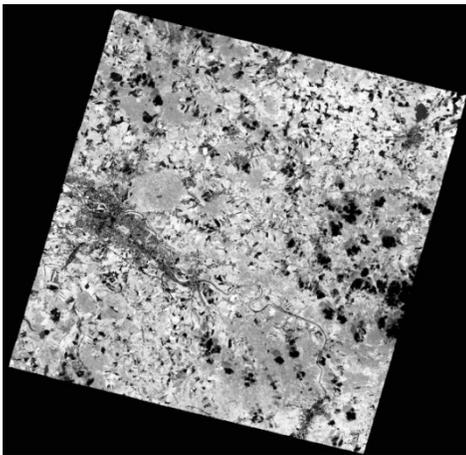


Abbildung 9: NDVI (LTOA)

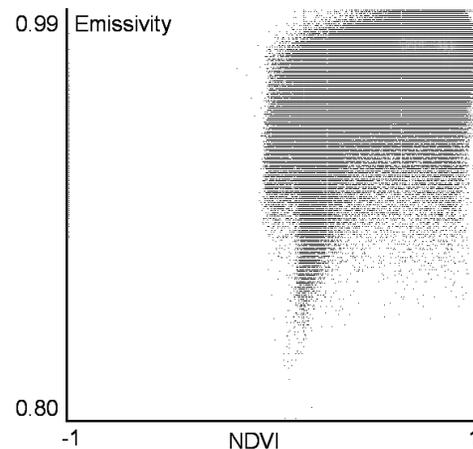


Abbildung 10: Scatterplot NDVI vs. Emissivität

Im vorliegenden Beispiel (ASTER-Szene vom 30.5.2004) sind Emissivität und $NDVI_{TOA}$ nur schwach korreliert. Ein statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen diesen Größen ist daher nicht wahrscheinlich, was durch den Scatterplot (s. Abbildung 10) weswegen auf die weitere Untersuchung (d. h. Atmosphärenkorrektur der optischen Daten und Bestimmung des reflektanzbasierten NDVI) verzichtet wurde.

3.2.2 Zusammenhang der Emissivität mit stadtstrukturellen Eigenschaften

Da ein direkter Zusammenhang der Emissivität und Bändern im sichtbaren und nahinfraroten Spektrum mit den vorliegenden Daten nicht nachgewiesen werden konnte, kann die Emissivität nur über bestimmte Klassifizierungen der Oberfläche zugewiesen werden. Gemäß dem REGKLAM-Projektantrag soll das thermale Verhalten verschiedener Oberflächen und Bedeckungstypen untersucht werden. Als Unterscheidungskriterium gilt hier zumeist der Grad der Versiegelung bzw. der Vegetationsbestand.

Diese Merkmale spiegeln sich in den Stadtstrukturtypen, die allerdings nur für das Stadtgebiet von Dresden zur Verfügung stehen. Daher konnte diese Untersuchung nur für die Landeshauptstadt, nicht aber für das gesamte Modellgebiet (bzw. für den abgedeckten Teil des Modellgebiets), durchgeführt werden.

Stadtstrukturdaten

Vom Umweltamt der Stadt Dresden wurden dem TP 3.1.2 Datensätze zur Stadtstruktur zur Verfügung gestellt, die bestimmte Merkmale flächendeckend für die Landeshauptstadt Dresden ausweisen (s. Abbildung 11).

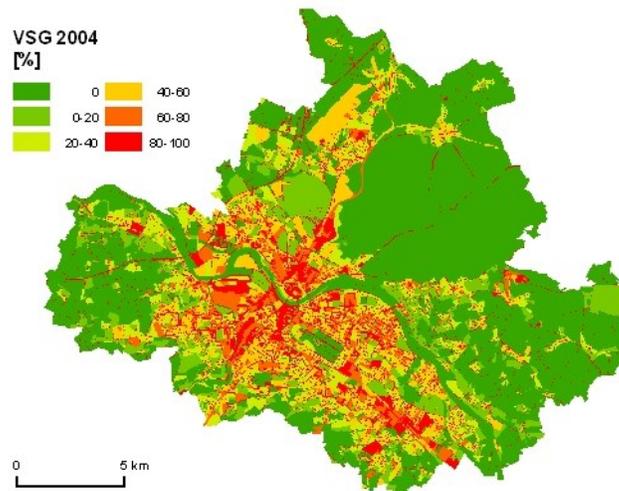


Abbildung 11: Versiegelungsgrad 2004 (IÖR/Umweltamt LHD)

Die Stadtstrukturtypenkartierung liegt für 2003, 2004 und 2006 als Polygondatensatz vor. Für jedes Polygon wird ein Versiegelungsgrad (VSG) als numerischer Schlüssel (0, 1, 2, 3, 4, 5) kodiert in 20-Prozent-Intervallen angegeben, wobei der Schlüssel 0 für vollständig unversiegelte Flächen steht, während der Schlüssel 5 den Bereich von 80 Prozent versiegelt bis vollversiegelt bezeichnet.

Auswertung der Emissivität nach Versiegelungsgrad

Nach der Aufrasterung der Polygone auf Pixelgröße 90 m entsprechend den ASTER-Daten konnten die Emissivitätspixel jeweils einer VSG-Klasse zugeordnet werden. Die Daten konnten somit differenziert nach Gruppenzugehörigkeit für beide Aufnahmezeitpunkte (30.4.2004 und 10.9.2004) statistisch ausgewertet werden.

Die Auswertung zeigte, dass die Streubreite der Emissivitäten innerhalb der Gruppen sehr hoch ist, so dass nicht gewährleistet werden kann, dass sich die VSG-Klassen bei den Emissivitätswerten nicht überlappen. Eine eindeutige Trennung ist demnach nicht möglich. Die Boxplots in Abbildung 12 und Abbildung 13 verdeutlichen dies (Die Emissivität auf der Y-Achse ist analog zu den ASTER-2B04-Daten mit 1000 skaliert.) Es wird jedoch auch die Tendenz der abnehmenden Emissivität bei zunehmender Versiegelung deutlich, wobei dieser Zusammenhang zum ersten Aufnahmezeitpunkt deutlicher sichtbar ist.

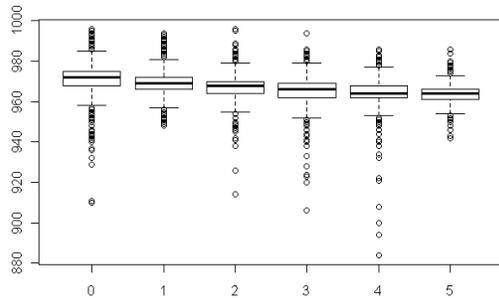


Abbildung 12: Emissivität nach VSG-Gruppen, 30.5.2004

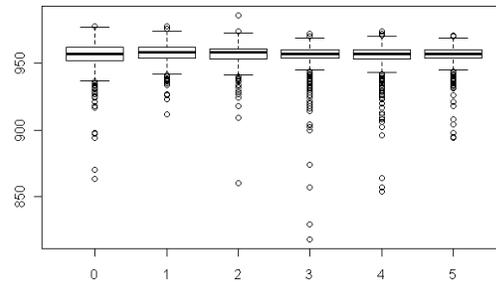


Abbildung 13: Emissivität nach VSG-Gruppen, 10.9.2004

Um die Unterscheidung nach VSG-Klassen zu rechtfertigen, wurden die Mittelwerte der unterschiedlichen VSG-Klassen miteinander verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich am 30.5.2004 die Mittelwerte aller sechs VSG-Klassen signifikant voneinander unterscheiden, während dies am 10.9.2004 nicht der Fall ist. Hier weisen die Mittelwerte der Klassen 3, 4, 5 keine signifikanten Differenzen auf, ebenso Klasse 0 und 2. Dies wird auch in der Abbildung 13 deutlich.

Um die Konstanz der Emissivität über die Zeit zu prüfen, wurden die Werte beider Aufnahmezeitpunkte für jede VSG-Klasse bzgl. Varianzhomogenität und Mittelwertgleichheit untersucht (s. Tabelle 9: Mittlere Emissivitäten der VSG-Klassen und Differenzen zwischen den Aufnahmezeitpunkten).

Tabelle 9: Mittlere Emissivitäten der VSG-Klassen und Differenzen zwischen den Aufnahmezeitpunkten

VSG	N (Anzahl Pixel)	30.5.2004	10.9.2004	Differenz (*Sign.)
0	15605	0,972	0,957	-0,015*
1	4874	0,969	0,957	0,012*
2	4228	0,967	0,957	0,011*
3	3715	0,966	0,956	0,010*
4	2167	0,964	0,956	0,009*
5	2071	0,964	0,956	0,008*

Es wird deutlich, dass die Emissivität, die für den 10.9.2004 angegeben wird, weit weniger differenziert ausfällt als am 30.5.2004. Des Weiteren sind die Emissivitätsunterschiede zwischen den Aufnahmetagen innerhalb jeder VSG-Klasse signifikant, d. h. man kann prinzipiell nicht von einer konstanten Emissivität für dieselbe Oberfläche ausgehen. Zum einen erklärt sich dies aus der Variabilität, die sich natürlicherweise durch die jahreszeitlich bedingte Veränderung in der Vegetationsdecke einstellt, zum anderen ist spielt auch die Feuchtigkeit der Oberfläche eine Rolle. Andererseits sind beide Datensätze in unterschiedlicher Stärke von dem oben beschriebenen Streifeneffekt betroffen, was die Ergebnisse ebenfalls beeinflussen dürfte.

4. Ergebnisse der Datenmodellierung

4.1 Ableitung von Emissivitätswerten für die LST-Berechnung

Trotz der nicht einheitlichen Ergebnisse der beiden Aufnahmezeitpunkte legen die ASTER-Daten nahe und erscheint es sinnvoll, die für die Bestimmung von Oberflächentemperaturen erforderliche Emissivität an den Versiegelungsgrad zu koppeln. Eine weitere Unterteilung, z. B. durch Stadtstrukturtypen (SST) oder Stadtvegetationsstrukturtypen (SVST) ist mit den vorhandenen Daten nicht möglich, da diese einem zu starken Rauschen unterliegen bzw. die Rasterweite von 90 m eine eindeutige Zuweisung zu noch differenzierteren Einheiten nicht zulässt.

Tabelle 10: Emissivitäten auf VSG-Basis

Versiegelungsgrad	Emissivität ϵ
0	0,964
0–20	0,963
20–40	0,962
40–60	0,961
60–80	0,960
80–100	0,960

Für die weitere Verarbeitung der Landsat-Thermaldaten wurden die in

Tabelle 10 genannten Emissivitäten für das Stadtgebiet von Dresden festgelegt. Sie bilden als Mittelwerte der Zahlen aus Tabelle 9 die Grundlage der Berechnung der städtischen Oberflächentemperatur. Für die Jahre 2003, 2004 und 2006 konnten somit Emissivitätsdaten als Rasterdaten für das Stadtgebiet der Landeshauptstadt (jeweils in den Grenzen von 2006) erstellt werden, die als Eingangsdatensatz in die LST-Modellierung eingehen können (s. Abbildung 15).

Da die Versiegelungsdaten nur für das Stadtgebiet von Dresden zur Verfügung stehen, können die Emissivitäten in

Tabelle 10 nicht auf die gesamte Modellregion angewendet werden. Um auf regionaler Ebene zu Ergebnissen zu kommen, wurde daher ein Mittelwert abgeleitet, der für die Modellregion gültig ist. Dazu wurden für beide ASTER-Aufnahmezeitpunkte in dem die Modellregion überdeckenden Teil unter Ausschluss der Wolkenmaske (nur für 30.5.2004) jeweils 10 000 zufällige Punkte generiert und für diese die Emissivität abgegriffen. Die Verteilung der Punkte ist in Abbildung 14 ersichtlich.

Der errechnete Mittelwert aller 20 000 Punkte beträgt im Wellenlängenbereich 10,25–11,65 μm (ASTER-Bänder 13/14) $\epsilon = 0,96$. Mit diesem konstanten Wert wurden Oberflächentemperaturbilder für die REGKLAM-Modellregion berechnet (analog Modell in Abbildung 6).

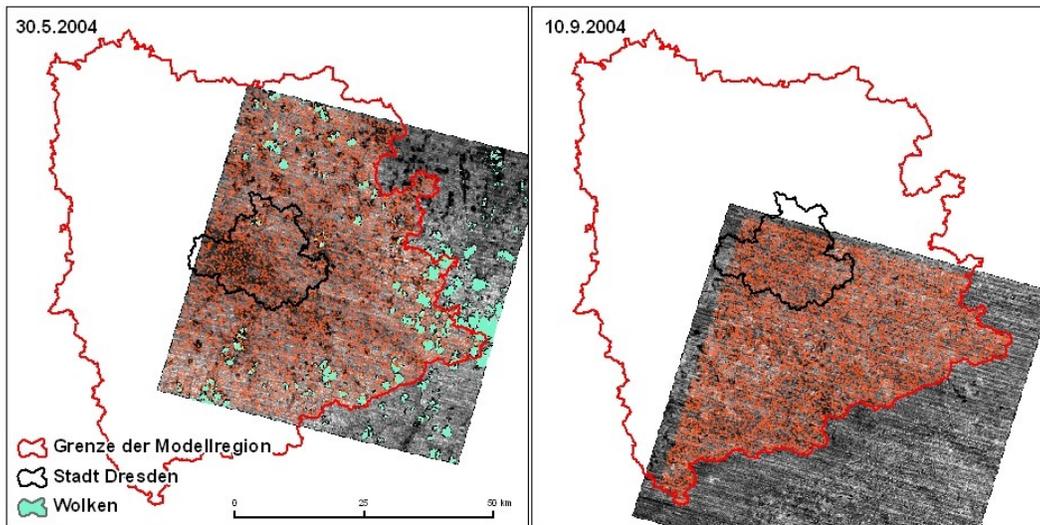


Abbildung 14: Verteilung der Punkte zu Bestimmung der mittleren Emissivität in der Modellregion

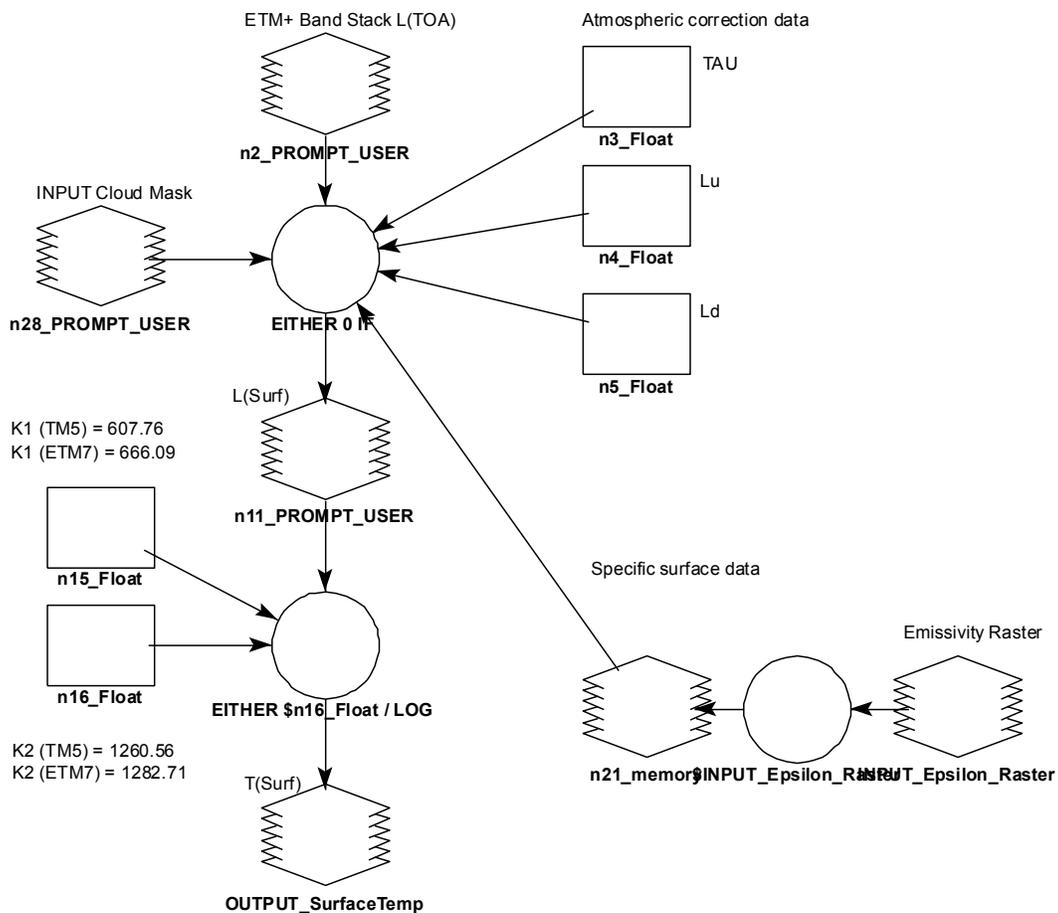


Abbildung 15: Modellablauf zur Ableitung von LST aus Strahlungswerten (Emissivität ϵ als Rasterdatensatz)

4.2 Berechnung der Oberflächentemperatur

Mit Hilfe der VSG-basierten Emissivitätskartierung im Stadtgebiet von Dresden konnten die Landsat-Thermalaufnahmen in Oberflächentemperaturen umgerechnet werden, wobei jeweils das Raster zugrundegelegt wurde, die dem Aufnahmedatum der Satellitenszene zeitlich am nächsten liegt. Für die Modellregion wurde die Berechnung mit dem ε -Mittelwert von $\varepsilon=0,96$ durchgeführt.

4.2.1 Einzeldatensätze und abgeleitete Temperaturmittelwerte

Für die REGKLAM-Modellregion stehen für insgesamt zehn Aufnahmezeitpunkte zwischen Juni 2000 und Juli 2008 Oberflächentemperaturen zur Verfügung, wobei die tatsächliche Abdeckung der Region unterschiedlich groß ist. Dies ist zum einen der Randlage bzgl. der Kachelgrenzen und unterschiedlich starker Bewölkung geschuldet. Zum anderen kann ETM+ an Bord von Landsat 7 seit 2003 aufgrund des Ausfalls des Scanline Correctors (SLC) die Vorwärtsbewegung des Satelliten nicht mehr ausgleichen, was in Klaffungen zwischen im Bild resultiert, die mit zunehmendem Abstand zur Bildmitte größer werden.

Für das Gebiet der Landeshauptstadt wurden für Hitzetage, Sommertage und die Nacht jeweils zwei Aufnahmen gemittelt (Tabelle 11), so dass insgesamt drei nahezu wolkenfreie Temperaturkarten errechnet werden konnten.

Tabelle 11: Eingangsdaten zur Modellierung der mittleren Oberflächentemperatur für die Stadt Dresden

Kenntag	Aufnahmedatum	Sensor/Plattform	VSG-Kartierung
Heißer Tag	20.06.2000	ETM+/Landsat7	2003
	22.07.2006	TM/Landsat5	2006
Sommertag	28.07.2002	ETM+/Landsat7	2003
	13.06.2006	TM/Landsat5	2006
Nacht/später Abend	13.08.2000	ETM+/Landsat7	2003
	19.08.2002	ETM+/Landsat7	2003

Für die Modellregion existieren keine Mehrfachaufnahmen, die allesamt wolkenfrei sind. Daher wurden hier für Hitzetag und Sommertag alle verfügbaren Szenen gemittelt (s. Tabelle 12). Dadurch kann nicht für jedes Pixel dieselbe Anzahl von Beobachtungen zur Temperaturmittelung herangezogen werden, was teilweise in Wertesprüngen und -mustern im Kartenbild resultiert. Daher wird in der Nebenkarte die Anzahl der Beobachtungen angegeben (s. Karte 5, Karte 6, Karte 7).

Tabelle 12: Eingangsdaten zur Modellierung der mittleren Oberflächentemperatur für die Modellregion

Kenntag	Aufnahmedatum	Sensor/Plattform
Heißer Tag	20.06.2000	ETM+/Landsat7
	18.06.2002	TM/Landsat5
	22.07.2006	TM/Landsat5
	28.07.2008	ETM+/Landsat7
Sommertag	28.07.2002	ETM+/Landsat7
	09.08.2004	ETM+/Landsat7
	13.06.2006	TM/Landsat5
	22.05.2007	ETM+/Landsat7
Nacht	13.08.2000	ETM+/Landsat7
	19.08.2002	ETM+/Landsat7

4.2.2 Interpretation der Ergebnisse

Einzelaufnahmen eines Thermalsensors spiegeln stets die konkrete Situation des Aufnahmetages wider. Die Kartierung von gemittelten Oberflächentemperaturen mehrerer Aufnahmen unter bestimmten gleichbleibenden meteorologischen Voraussetzungen (Hitzetag, Sommertag, Nacht) ermöglicht hingegen eine Aussage über gleichbleibende Muster in der Temperaturverteilung, wobei die absoluten Temperaturwerte natürlich abweichen können. Zu beachten ist auch, dass die Mittelung nur für Gebiete sinnvoll ist, die zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten etwa gleichbleibend strukturiert sind, was für landwirtschaftlich genutzte Flächen nicht der Fall ist, da hier, je nach Art und Wachstumsstadium der angebauten Pflanzen, die thermischen Verhältnisse stark variieren.

Die nachfolgende Darstellung und Interpretation der Ergebnisse bezieht sich daher maßgeblich auf die (bebauten) Siedlungsflächen.

Karte 1 und Karte 2 zeigen die mittleren Verhältnisse an heißen Tagen und Sommertagen bei identischer Werteskalierung. Erwartungsgemäß treten die Bebauungsgebiete im Stadtgebiet deutlich als Wärmespeicher hervor.

An heißen Tagen ist eine Differenzierung der Oberflächentemperaturen schwierig vorzunehmen, da sich offensichtlich nahezu die gesamte bebaute Fläche der Stadt (je nach Art der Klassifizierung) homogen aufheizt. Im Vergleich mit den Werten an Sommertagen treten jedoch einige Zonen hervor, die sich besonders schnell (d. h. auch bei niedrigeren Lufttemperaturen) erwärmen. Dazu gehören insbesondere der Güterbahnhof Friedrichstadt, das Industriegelände, der Flughafen Dresden und größere Gewerbegebiete (Elbepark, Übigau, Nickern, entlang der Eisenbahnstrecke nach Heidenau). In der Darstellung für heiße Tage treten weiterhin große innerstädtische Bereiche als sehr warm hervor. Dies betrifft sowohl Wohngebiete (z. B. Gründerzeitviertel Äußere Neustadt, Leipziger Vorstadt, Pieschen, Plattenbaugebiet Gorbitz) als auch Industrie- und Gewerbegebiete (z. B. „Lingnerstadt“). Flächen mit großer Schienennetzdicke erhitzen sich ebenfalls sehr stark (Hauptbahnhof, Güterbahnhof, Bereich Zwickauer Straße/Nossener Brücke). Vergleichsweise kühl (aber dennoch mit mittleren Oberflächentemperaturen von mehr als 35 °C) bleiben Bereiche mit aufgelockerter Bebauung (Striesen, Südvorstadt, Plauen)

Besonders an heißen Tagen verbleiben im Stadtgebiet nur wenige Zonen mit relativ kühler Oberfläche. Die sind insbesondere Dresdner Heide, Junge Heide, Großer Garten und Waldpark als größere innerstädtische Park- bzw. Waldflächen. Auch kleinere vegetationsbestandene Flächen (Friedhöfe) und relativ stark durchgrünte Stadtteile (z. B. Beutlerpark und angrenzende Bereiche der Südvorstadt) sind als etwas kühlere Zonen im Vergleich zur Umgebung erkennbar. Wasserflächen stellen die kühlestes Oberflächen im Stadtgebiet dar. Die größten sind Elbe, Staubecken Ober- und Niederwartha und Kiesgrube Leuben. Aber auch kleine Flächen wie Carolateich und Zwingerteich bilden sich v. a. an heißen kontrastreich im Thermalbild ab.

Das Nachtbild zeigt, dass sich insbesondere freie Oberflächen (Wiesen ohne dichten Baumbestand) relativ stark im Vergleich zur Umgebung abkühlen (Elbwiesen Johannstadt-Blasewitz, Pferderennbahn). Tagsüber sehr heiße Zonen bleiben auch am Abend relativ lange wärmer als andere. Insgesamt ist jedoch das Nachtwärmebild deutlich homogener und umfasst einen geringeren Temperaturbereich als die Tagesaufnahmen.

Im Differenzbild der mittleren Oberflächentemperaturen (Karte 4) zwischen Sommertag und Nacht wird deutlich, wie unterschiedlich die verschiedenen städtischen Strukturen in ihrem Thermalverhalten sind. Oberflächen bebauter Bereiche, die tagsüber die stärkste Aufheizung aufweisen, erfahren die größten Temperaturunterschiede, die z. T. weit über 20 K liegen. Dagegen sind Wasserflächen und von dichter Vegetation bestandene Gebiete relativ konstant.

Für die anderen städtischen Bereiche der Modellregion lassen sich ähnlich differenzierte Aussagen nur bedingt treffen. Durch die vergleichsweise grobe Auflösung der Ergebnisbilder werden Mittelstädte wie Pirna, Meißen oder Riesa nur durch wenige Pixel repräsentiert, die keine ausreichende Datengrundlage zur differenzierten thermischen Charakterisierung dieser Siedlungsräume darstellen. Dennoch weisen die städtisch geprägten Bereiche der Modellregion grundsätzlich deutlich höhere Oberflächentemperaturen im Gegensatz zu ihrer ländlichen Umgebung auf. Um die thermische Belastung in diesen Bereichen differenzierter untersuchen zu können, sollte auf Messungen bzw. auf feinskalige Modellierungen unter Verwendung von stadtstrukturellen Grundlagendaten zurückgegriffen werden.

4.2.3 Verwertung und Fortführung der Ergebnisse

Bioklimatische Modellierung

Die Oberflächentemperaturdatensätze werden im Verlauf des Projektes als Eingangsdatensatz für weitere Modellierungen verwendet werden. Insbesondere wird untersucht werden, inwieweit sich fernerkundlich gewonnene flächendeckende Daten mit In-Situ-Daten und mit modellierten Werten zur bioklimatischen Belastung in Beziehung setzen lassen.

Zur flächendeckenden Darstellung der bioklimatischen Belastung im Stadtgebiet ist die Oberflächentemperatur eine wichtige Datengrundlage. Sie stellt den einzigen flächendeckend verfügbaren Datensatz zur thermalen Charakterisierung von Siedlungsstrukturen dar. Durch die Verwendung von Messdaten (siehe Produkt 3.1.2 b) in bioklimatischen Modellen (z. B. RayMan Pro, siehe Produkte 3.1.2 b und 3.1.2 c) kann für typische Bebauungs- und Flächennutzungssituationen ein Index für die bioklimatische Belastung errechnet werden. In der Regel kommt dabei die Physiologic Equivalent Temperature (PET) zur Anwendung. Durch

Ermittlung des statistischen Zusammenhangs zwischen PET und physischen Parametern wie der Oberflächentemperatur kann so eine flächendeckende Abschätzung der Belastung im Stadtgebiet getroffen werden. Diese bildet wiederum eine Grundlage für die Ausweisung besonders sensibler Siedlungsbereiche im Hinblick auf Hitzeereignisse (siehe Produkt 3.1.2 c).

Verbesserung der Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse

Die Qualität der Temperaturdatensätze hängt maßgeblich von den Faktoren der Atmosphärenkorrektur und der verwendeten Emissivität der Erdoberfläche ab. Für letztere lassen sich mit Hilfe der ASTER-Daten Mittelwerte für Oberflächen mit bestimmten Versiegelungsklassen ermitteln. Da diese bislang nur für die Stadt Dresden vorliegen, wäre es wünschenswert, auch für urbane Bereiche außerhalb der Landeshauptstadt eine Versiegelungskartierung heranzuziehen. Damit kann die Zuverlässigkeit der Temperaturwerte in der Modellregion erhöht werden.

Mittels flugzeuggetragener thermaler Aufnahmesysteme kann eine weitaus höhere Auflösung erzielt werden, auch die Überflugzeiten könnten besser den Erfordernissen der Untersuchung von städtischen Wärmeinseln angepasst werden. Während die Landsat-Satelliten stets etwa bei gleicher Uhrzeit das Modellgebiet aufzeichnen, könnten Messflugzeuge auch zum Zeitpunkt der größten Abkühlung bzw. der größten Erwärmung starten.

Fortführung von Datenbeständen

Für ein Monitoring der Entwicklung von Oberflächentemperaturen bzw. der Veränderung des Verteilungsmusters ist eine kontinuierliche Akquirierung von Thermalscannerdaten erforderlich. Dies sind, je nach gewünschter Auflösung der Auswertung, Landsat- oder flugzeuggestützte Daten. Bei Landsatdaten ist zu beachten, dass Landsat 7 seit 2003 aufgrund des Ausfalls eines Bauteils nur sein Beobachtungsgebiet lückenhaft abdecken kann. Landsat 5 arbeitet zur Zeit regulär, weist aber im Thermalband nur eine Auflösung von 120 m auf.

Landsat 5 ist seit 1984, Landsat 7 seit 1999 im Einsatz (s. Abbildung 16). Für Dezember 2012 der Start der Landsat Data Continuity Mission (LDCM) geplant, die die Nachfolge von Landsat 5 und 7 antreten soll. An Bord von LDCM werden zwei Messinstrumente arbeiten. Zum einen der *Operational Land Imager (OLI)* mit neun Spektralkanälen im sichtbaren und nahen Infrarotbereich und einer 12-Bit-Quantisierung. Zum anderen wird der *Thermal Infra-Red Sensor (TIRS)* bei einer Auflösung von 100 m und 12-Bit-Quantisierung Thermalstrahlung aufzeichnen. Die Designlebensdauer wird mit 5 (OLI) bzw. 3 Jahren (TIRS) angegeben. Über die Kosten der Daten werden derzeit noch keine Angaben gemacht (LDCM online, 2010).

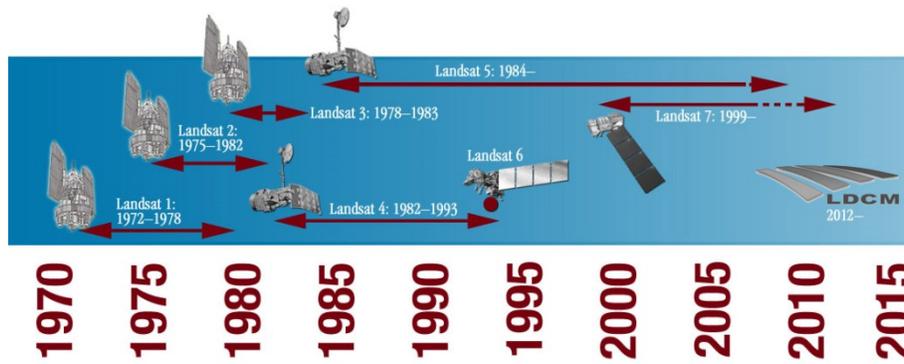
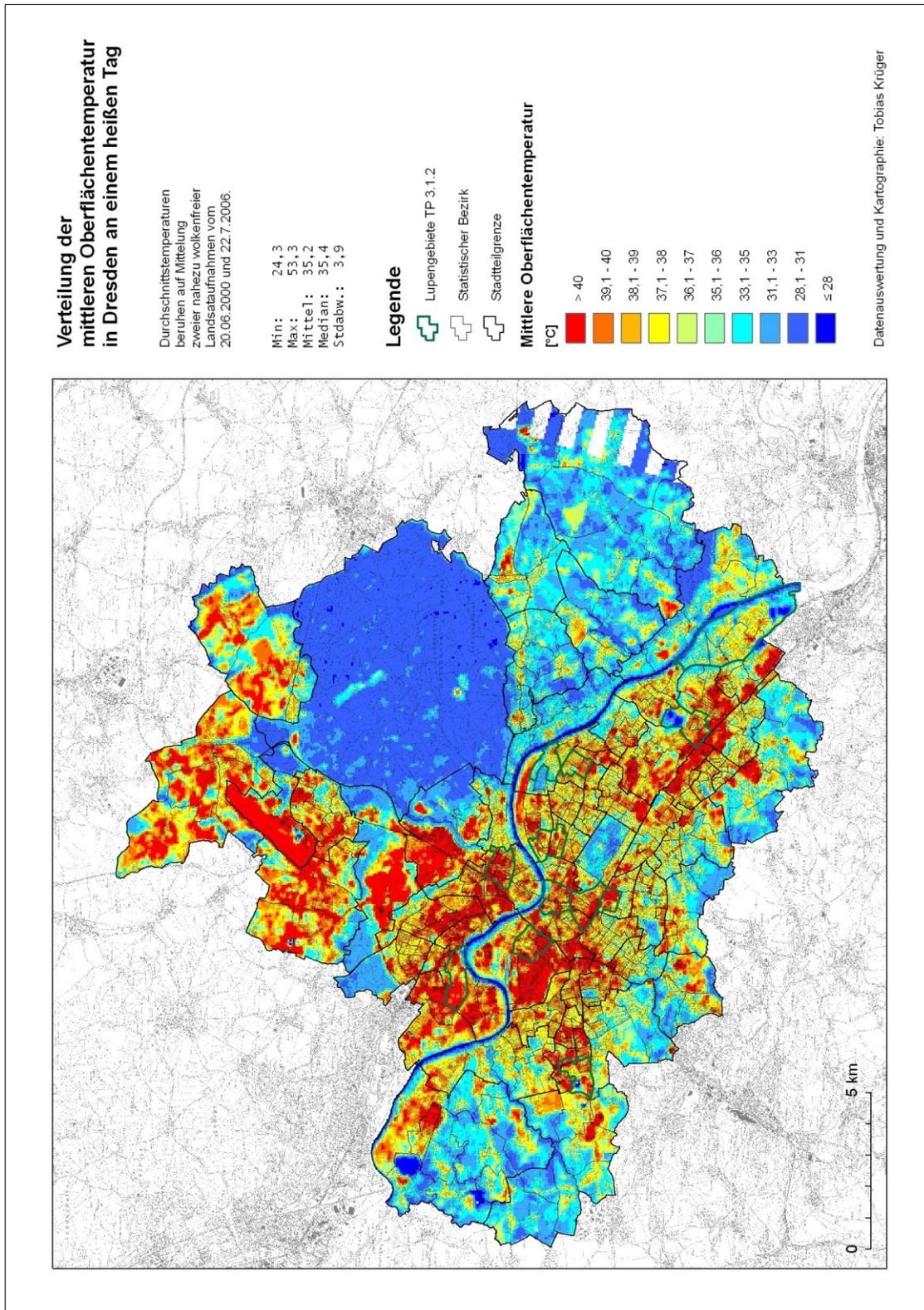


Abbildung 16: Landsat-Missionen (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/graphics/timeline.jpg>)

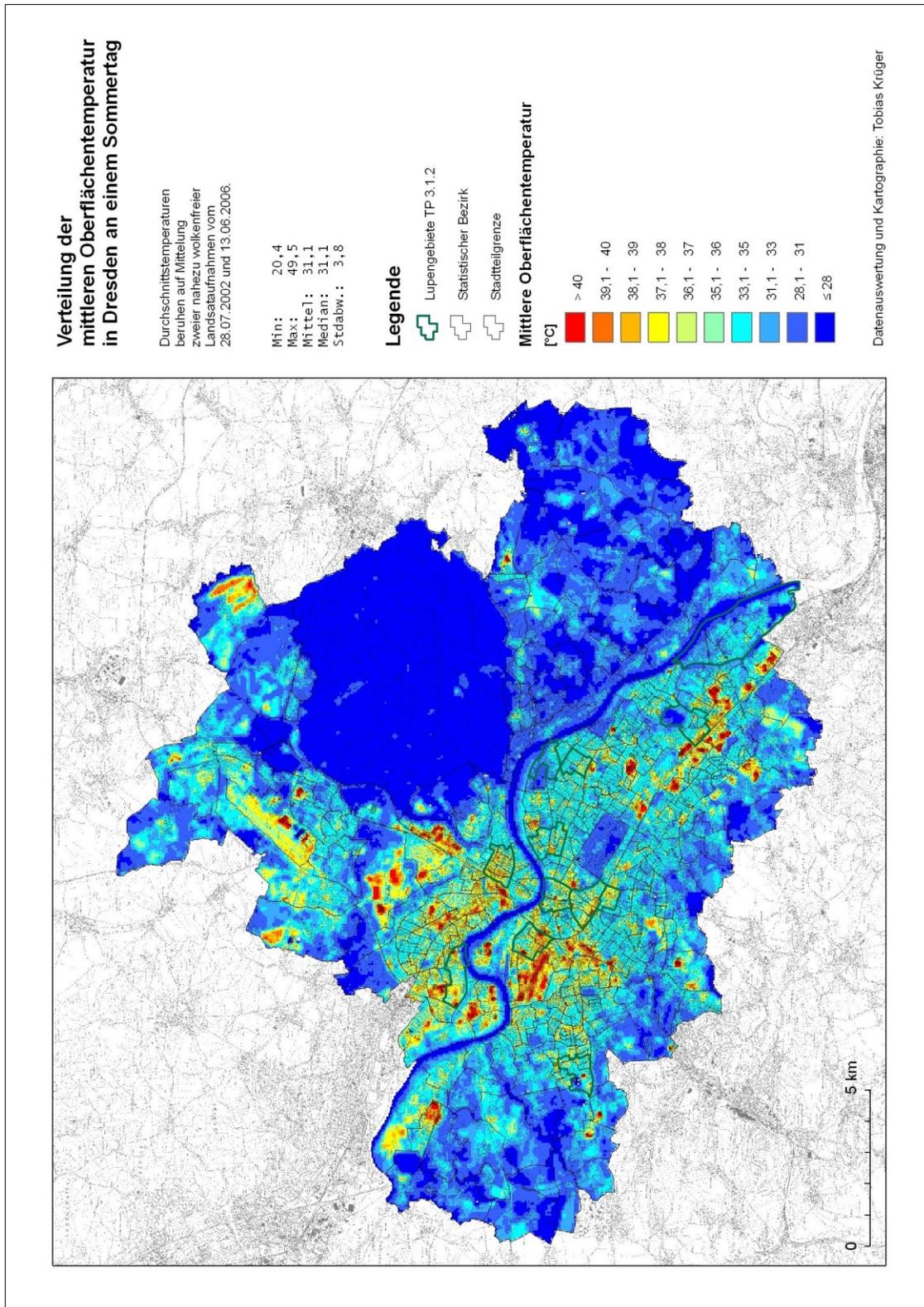
Auch die fortgesetzte Kartierung (bzw. im größten Teil der Modellregion zunächst deren Erhebung) der Versiegelungsklassen ist nötig, um die Satellitendaten effizienter auswerten zu können.

4.3 Karten

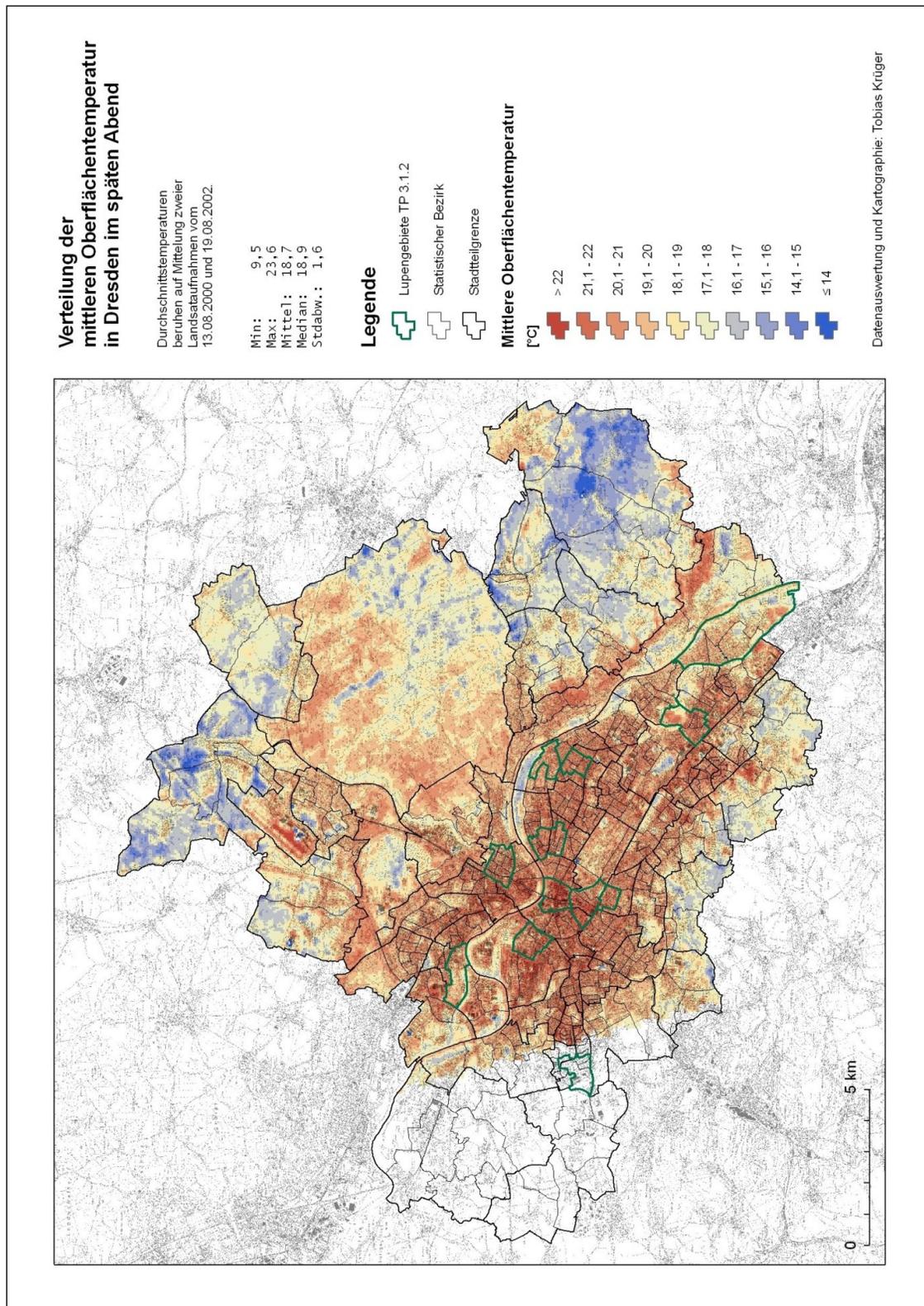
Karte 1: Mittlere Oberflächentemperatur in Dresden an einem heißen Tag	40
Karte 2: Mittlere Oberflächentemperatur in Dresden an einem Sommertag	41
Karte 3: Mittlere Oberflächentemperatur in Dresden am späten Abend	42
Karte 4: Mittlere Oberflächentemperaturdifferenz zwischen Sommertag und Nacht	43
Karte 5: Verteilung der Oberflächentemperatur in der Modellregion an heißen Tagen	44
Karte 6: Verteilung der Oberflächentemperatur in der Modellregion an Sommertagen	45
Karte 7: Verteilung der Oberflächentemperatur in der Modellregion am späten Abend	46



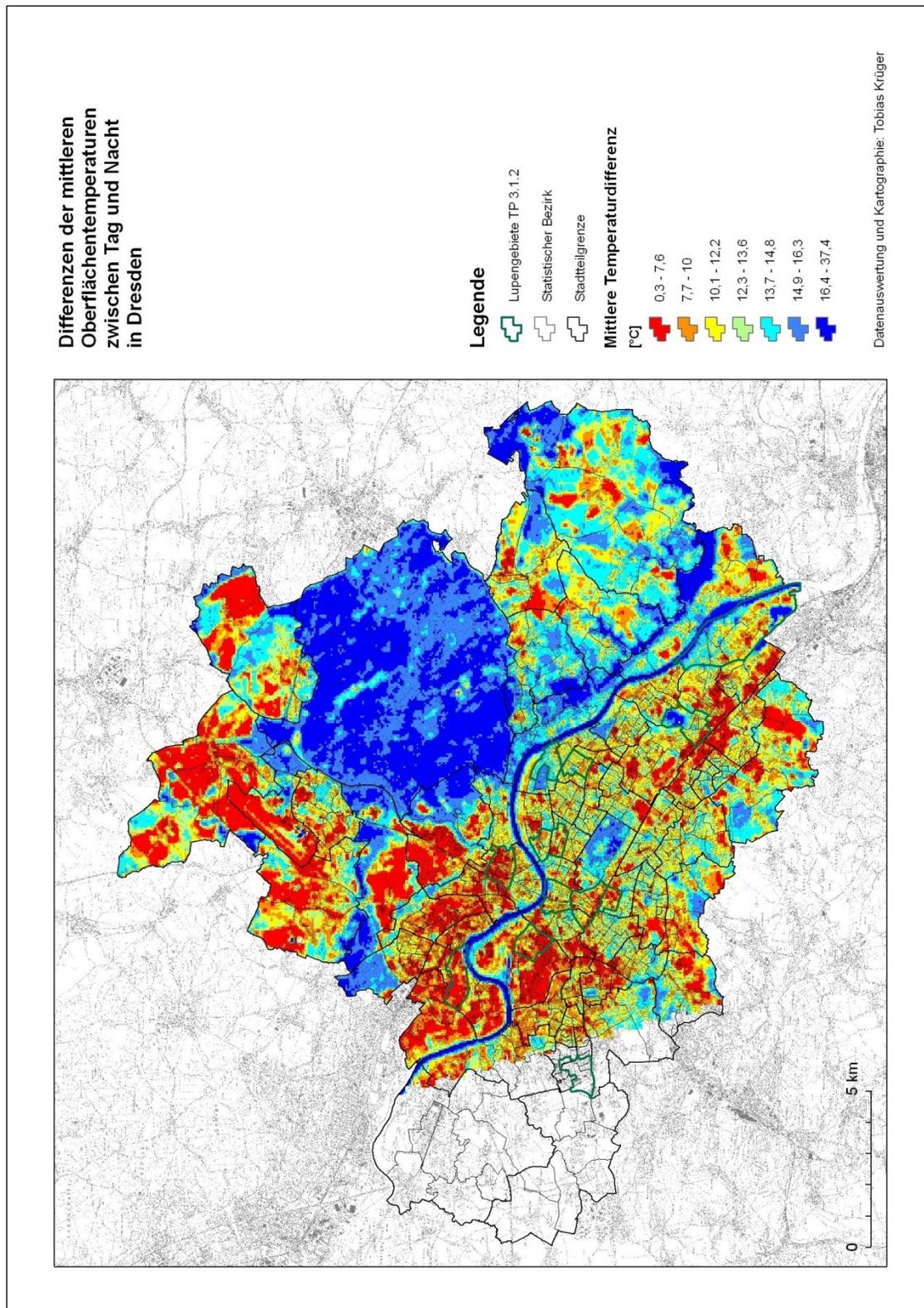
Karte 1: Mittlere Oberflächentemperatur in Dresden an einem heißen Tag



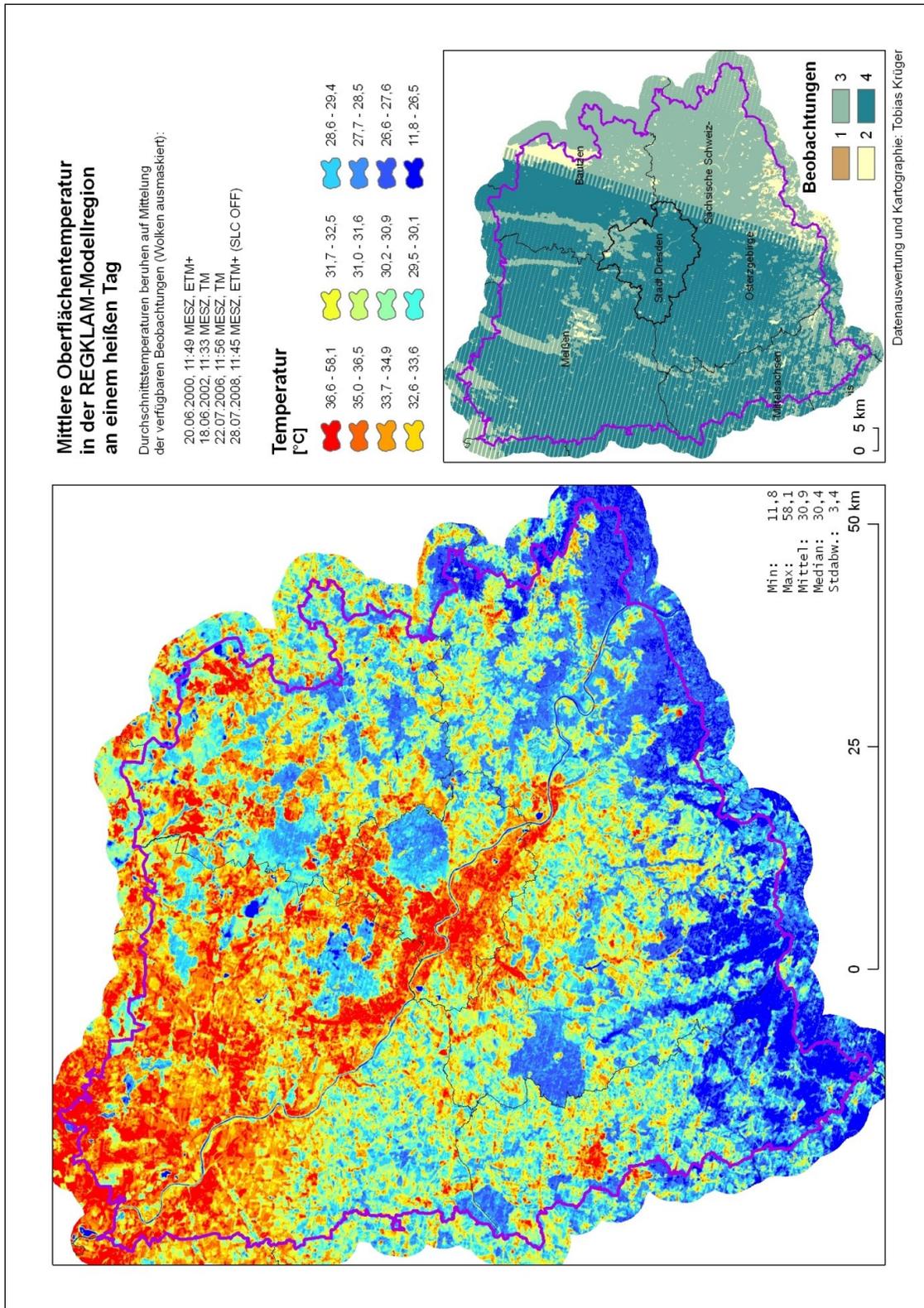
Karte 2: Mittlere Oberflächentemperatur in Dresden an einem Sommertag



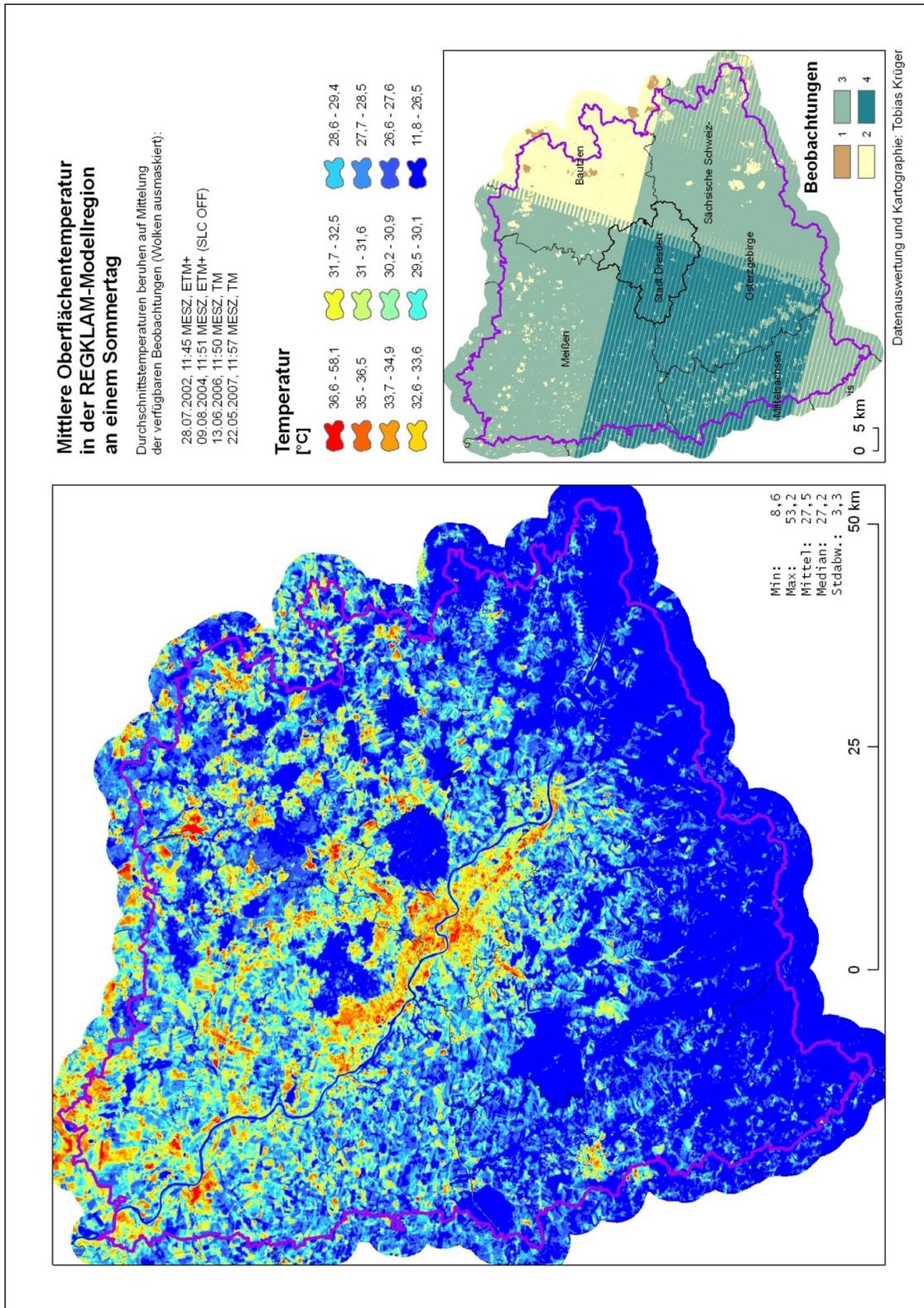
Karte 3: Mittlere Oberflächentemperatur in Dresden am späten Abend



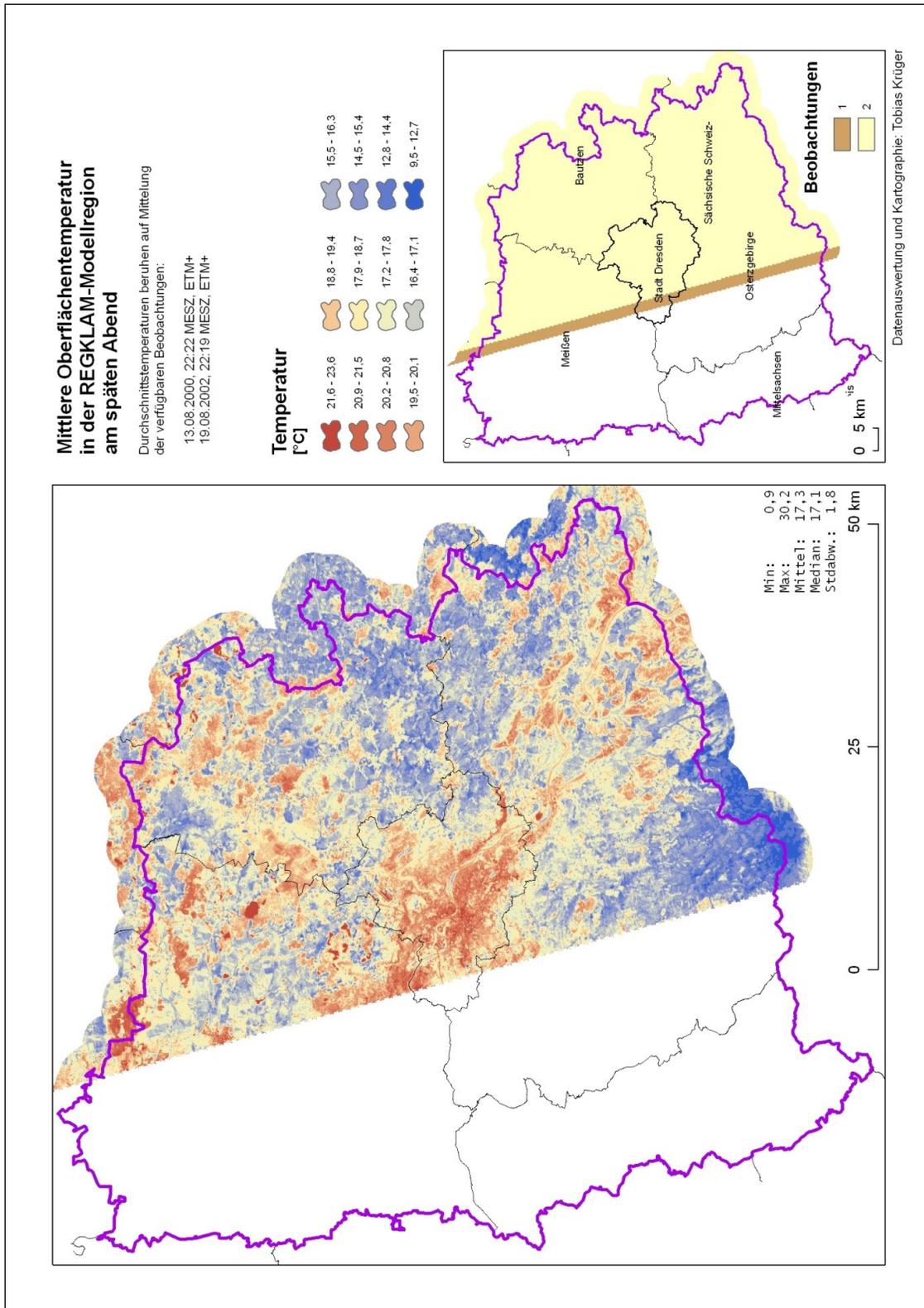
Karte 4: Mittlere Oberflächentemperaturdifferenz zwischen Sommertag und Nacht



Karte 5: Verteilung der Oberflächentemperatur in der Modellregion an heißen Tagen



Karte 6: Verteilung der Oberflächentemperatur in der Modellregion an Sommertagen



Karte 7: Verteilung der Oberflächentemperatur in der Modellregion am späten Abend

5. Literatur

- BARSI, J. A.; BARKER, J. L. & SCHOTT, J. R. (2003): An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03, 2003
- BARSI, J. A.; SCHOTT, J. R.; PALLUCONI, F. D. & HOOK, S. J. (2005): Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments. Earth Observing Systems X, Proc. SPIE, 2005:5882
- CHANDER, G. & MARKHAM, B. L. HELDER, D. L. (2009): Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment, 113:893–903
- Dash, P.; Götsche, F. M.; Olesen, F. S. & Fischer, H. (2002): Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23:2563–2594
- GONG, A.; CHEN, Y.; LI, J. & CHEN, Z. (2005): Study on urban land surface temperature retrieval based on landsat TM remote sensing images in Beijing. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05. Proceedings. IEEE International, 2005, 5:3258–3261
- GRIEND, A. A. V. D. & OWE, M. (1993): On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. International Journal of Remote Sensing, 14:1119–1131
- IRISH, R. R. SHEN, S. S. & DESCOUR, M. R. (ED.) (2000): Landsat 7 automatic cloud cover assessment. Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI, SPIE, 4049:348–355
- LDSCM (2010): Landsat Data Continuity Mission.
<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/ldcm.html>. Online-Dokument (letzter Zugriff: 25.05.2010)
- NICHOL, J. E. (1998): Visualisation of urban surface temperatures derived from satellite images. International Journal of Remote Sensing, 19:1639–1649
- STATHOPOULOU, M. & CARTALIS, C. (2009): Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation Remote Sensing of Environment, 113:2592–2605
- VOOGT, J. A. & OKE, T. R. (2003): Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 86:370–384
- ZHANG, J.; WANG, Y. & LI, Y. (2006): A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band 6. Computers & Geosciences, 32:1796–1805

Kontakt

Jörg Hennersdorf, Dr. Tobias Krüger, Dr. Sebastian Hoechstetter

Leibniz-Institut für ökologische Raumordnung e.V.

Weberplatz 1, 01217 Dresden

Tel.: 0351/4679-0

Fax: 0351/4679-212

E-Mail: j.hennersdorf@ioer.de / t.krueger@ioer.de / s.hoechstetter@ioer.de

Wissenschaftliches Projektmanagement:

Alfred Olfert & Janet Prechtel

Leibniz-Institut für ökologische Raumordnung e.V.

Weberplatz 1, 01217 Dresden

Tel.: 2092300

Fax: 2098729

E-Mail: a.olfert@ioer.de j.prechtel@ioer.de