

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften  
Institut für physische Geographie

**Validierung und Kalibrierung von remote-sensing  
basierten Temperatur- und  
Siedlungsstrukturdaten für die urbane  
Agglomeration Hyderabad/Indien**

Bachelorarbeit

Studiengang: Geographie (Bachelor of Science)

Vorgelegt von: Felix Bostel

Matrikelnummer:: 2744087

Abgabe: 1. Oktober 2012

Betreuer der Arbeit: Dr. Matthias K. B. Lüdeke  
Potsdam Institut für Klimafolgenforschung

Referent: Dr. Steffen Vogt  
Institut für physische Geographie

Co -Referent Prof. Dr. Tim Freytag  
Institut für Kulturgeographie

## Verzeichnis der Abkürzungen

GHMC	Greater Hyderabad Municipal Cooperation
HMDA	Hyderabad Metropolitan Development Authority
HUDA	Hyderabad Urban development Authority
MCH	Municipal Cooperation oh Hyderabad
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
PIK	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
$T_a$	Lufttemperatur
$T_{a \max}$	Maximum der Lufttemperatur
$T_{a \min}$	Minimum der Lufttemperatur
$T_o$	Oberflächentemperatur
UHI	Urban heat island (urbane Wärmeinsel)

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit fernerkundungsbasierten Daten zur Oberflächentemperatur und zu Siedlungsstrukturen der urbanen Agglomeration Hyderabad in Indien. Zusätzlich zu den fernerkundungsbasierten Daten wurden, während eines fünf wöchigen Feldaufenthaltes, Daten zur Lufttemperatur und zur Verteilung von informellen Siedlungen erhoben. Es werden die Kriterien beschrieben, nach denen die Temperaturmesspunkte ausgewählt wurden. Um unbrauchbare Messungen herauszufiltern, wurde ein statistisches Verfahren angewendet. Die Ergebnisse der Kurzzeitlufttemperaturmessungen wurden in Bezug zu Daten der einzigen offiziellen Wetterstation (Begumpet) in Hyderabad gesetzt. Dadurch konnten die Messungen einer weiteren Qualitätsprüfung unterzogen werden. Der Vergleich diente weiterhin dazu, sich stark und weniger stark aufheizende Gebiete zu identifizieren. Diese Sachverhalte wurden dann interpretiert und Hypothesen zu den Ursachen aufgestellt. Im Anschluss folgt eine Beschreibung des „Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer“ (MODIS)-Satelliten. Die von dort bezogenen Daten zur Oberflächentemperatur wurden in Bezug zur Lufttemperatur gesetzt. Hierzu wurde anhand einer langjährigen Datenreihe ein Regressionsmodell erstellt. Dieses wurde dann auf die MODIS-Daten zur Zeit des Feldaufenthaltes angewendet und in Bezug zu den Kurzzeitlufttemperaturmessungen gesetzt. Eine direkte Korrelation konnte nicht festgestellt werden. Allerdings gelang es, einen Zusammenhang bei der Betrachtung eines etwa zweiwöchigen Mittelwertes zwischen der gemessenen Lufttemperatur und den MODIS-Daten zu zeigen. Es wurde weiterhin ein im Projekt „Sustainable Hyderabad“ entwickelter Algorithmus zur Identifizierung von Slums aus QuickBird-Daten validiert. Zunächst wird die Funktionsweise des Algorithmus beschrieben, dann werden die Kriterien behandelt, nach denen während des Feldaufenthaltes ein Gebiet als Slum klassifiziert wurde. Acht der neun durch den Algorithmus als Slum identifizierten Gebiete wurden durch die Feldbeobachtungen bestätigt. Es wird eine Hypothese aufgestellt, wie es zur Fehlklassifikation kam. Abschließend werden die Verwendungsmöglichkeiten des Algorithmus diskutiert.

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen .....	i
Zusammenfassung.....	ii
Inhaltsverzeichnis .....	iii
Abbildungsverzeichnis .....	v
Tabellenverzeichnis .....	v
1 Einleitung .....	1
1.1 Relevanz des Themas/Motivation .....	1
1.2 Fragestellung .....	2
1.3 Stand der Wissenschaft .....	2
2 Methode .....	5
2.1 Auswahl des Untersuchungszeitraums für die Lufttemperaturmessungen.....	5
2.2 Verwendete Lufttemperaturmessgeräte .....	5
2.3 Bestimmung von Messfehlern.....	5
2.4 Slum Definition .....	6
2.5 Kriterien der Slumerkennung .....	6
2.6 Slumerkennungsalgorithmus und Auswahl der Untersuchungsgebiete .....	7
3 Datengrundlage .....	9
3.1 Wetterdaten der Station Begumpet.....	9
3.2 Auswahl der Messgebiete .....	11
3.3 Auswahl der Messpunkte .....	11
3.4 Daten des MODIS Satelliten .....	13
4 Ergebnisse.....	15
4.1 Interpretation der Messergebnisse.....	15
4.2 Korrelation MODIS-Begumpet.....	21
4.3 Modiszeitreihen-Messzeitreihen.....	24
4.4 Validierung des Slumidentifizierungs-Algorithmus .....	28
4.4.1 Punkt 1.....	28
4.4.2 Punkt 2.....	29
4.4.3 Punkt 3.....	29
4.4.4 Punkt 4.....	30
4.4.5 Punkt 5.....	31
4.4.6 Punkt 6.....	32
4.4.7 Punkt 7.....	32

4.4.8	Punkt 8.....	33
4.4.9	Punkt 9.....	34
5	Diskussion .....	36
5.1	Temperaturverteilung: die Bodenmesskampagne.....	36
5.2	Temperaturverteilung: die Fernerkundung.....	37
5.3	Slumidentifizierung.....	38
	Danksagung .....	39
	Literaturverzeichnis.....	40
	Appendix.....	43
	Appendix 1: Berechnung von Ausreißern.....	43
	Appendix 2: Zeitreihen Begumpet/MP.....	50
	Appendix 3: MODIS bestes Modell/ $T_a$ .....	54
	Erklärung.....	60

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die untersuchten Gebiete .....	8
Abbildung 2: mittlerer Jahresgang von $T_{a\max}$ und $T_{a\min}$ an der Station Begumpet 1997-2007.....	9
Abbildung 3: Verlauf von $T_{a\max}$ und $T_{a\min}$ der Station Begumpet zur Zeit des Aufenthaltes.....	10
Abbildung 4: Wetterhütte .....	12
Abbildung 5: Messpunkt 9.   Abbildung 6: Messpunkt 7.....	13
Abbildung 7: Lage der Messpunkte auf einem Satellitenbild von Hyderabad .....	13
Abbildung 8: Regressionsgerade und 2.5- $\sigma$ -Korridor für MP9 .....	15
Abbildung 9: Vergleich von $T_a$ für MP 9 und Begumpet .....	16
Abbildung 10: Plot des besten Regressionsmodells.....	23
Abbildung 11: Vergleich von $T_a$ aus MODIS abgeleitet und $T_a$ am MP 8.....	25
Abbildung 12: Vergleich der Zeitreihe $T_a$ aus MODIS abgeleitet und $T_a$ am MP 8.....	25
Abbildung 13: Mittelwert der MODIS-basierten $T_o$ Werte im Vergleich mit den .....	
Mittelwerten der $T_a$ Messungen.....	27
Abbildung 14:Umgebung von Punkt 1.....	29
Abbildung 15: Umgebung des Punktes 3.....	30
Abbildung 16: Umgebung von Punkt 4.....	31
Abbildung 17: Umgebung von Punkt 5.....	31
Abbildung 18: Umgebung von Punkt 6.....	32
Abbildung 19: Umgebung von Punkt 7.....	33
Abbildung 20: Aufnahmen in der Umgebung von Punkt 8.....	33
Abbildung 21: Umgebung von Punkt 9.....	34

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakteristika der Messpunkte.....	19
Tabelle 2: Vergleich der Erwartung der MP mit den gemessen Werten.....	21
Tabelle 3: monovariates Modell.....	22
Tabelle 4: multivariates Modell.....	23
Tabelle 5: Korrelationstabellen .....	26
Tabelle 6: Kriterien der Slumerkennung und die Überprüfung vor Ort .....	35

# 1 Einleitung

Hyderabad ist die Hauptstadt des Bundesstaates Andra Pradesh. Hyderabad hatte im Jahr 1951 eine Million Einwohner. Durch starke Wachstumsraten, besonders in den 1980er Jahren (+50%) und 1990er Jahren (+27% ), wuchs diese bis zum Jahre 2001 auf 7 Millionen an (GHMC 2010). Es wird erwartet, dass die Agglomeration Hyderabad 2020 mehr als 10 Millionen Einwohner haben wird (MCH 2005), dann wäre Hyderabad als Megacity anzusehen.

## 1.1 Relevanz des Themas/Motivation

Eine prognostizierte Zunahme von Hitzewellen für die Region (Lüdeke et al. 2012) macht es erforderlich, diese schnell und kostengünstig zu erfassen. Hitzewellen stellen insbesondere die städtische Bevölkerung vor große Herausforderungen. Urbane Wärmeinseln können durch fernerkundungsbasierte Methoden identifiziert werden. So kann die Temperaturverteilung innerhalb von Städten besser erfasst werden, als dies durch Stationsmessungen möglich ist. Außerdem ist die Verfügbarkeit von Stationsdaten meist begrenzt. Im Fall von Hyderabad liegen lediglich die Daten der einzigen offiziellen Wetterstation, Begumpet, vor. Zudem sollte untersucht werden, wie gut Daten eines kleinräumigeren Netzes sind und ob diese Unterschiede in der Verteilung der Lufttemperatur erkennen lassen.

In Groß- und Megastädten in Entwicklungs- und Schwellenländern verändert sich die räumliche Verteilung von Slums schnell. Diese wachsen, je nach Gegebenheit, entweder in ihrer Ausdehnung oder es ist eine Zunahme der Bevölkerungszahlen zu verzeichnen. Slums können aus verschiedenen Gründen aufgewertet oder auch räumlich verlagert werden. Als Beispiel sei hier eine des Centre for Good Governance durchgeführte Studie genannt, die feststellte, dass 146 Slums einer Liste der Municipal Corporation of Hyderabad (MCH) nicht mehr existierten und 21 weitere von Apartmenthäusern oder Shopping Centern ersetzt wurden (Centre for Good Governance 2008). Wie im Abschnitt „Slum Definition“ näher beschrieben wird, existiert keine einheitliche Definition für Slums. Zudem gibt es uneinheitliche bzw. unvollständige Statistiken zu Slums. Laut Satterthwaite (2010) neigen viele nationale Erhebungen dazu, die Bevölkerungszahlen von informellen Siedlungen zu unterschätzen. Daraus ergibt sich der Bedarf, Slums schnell und kostengünstig zu erfassen. Auch eine möglichst objektive Klassifikation von Slums ist wünschenswert, um die Unabhängigkeit von den nach unterschiedlichen Kriterien erhobenen Statistiken zu gewährleisten. Die

Slumbevölkerung ist eine sehr vulnerable Bevölkerungsgruppe. Als ein Grund hierfür sei beispielsweise zu nennen, dass Slums häufig auf unbeanspruchtem Land, in der Nähe von Flüssen oder Kanälen liegen (Kit et al. 2012). Durch ihre Lage sind diese gegenüber Extremniederschlagsereignissen besonders anfällig. Eine Lokalisierung von Slums kann dazu beitragen, geeignete Infrastrukturmaßnahmen zu treffen um eine Verbesserung der Lebenssituation der Slumbevölkerung zu erzielen.

## 1.2 Fragestellung

Es ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Es soll überprüft werden, ob durch Kurzzeitlufttemperaturmessungen eine Aussage über die räumliche Verteilung der Lufttemperatur innerhalb der Stadt zu treffen ist. Liefern im Anschaffungspreis günstige Geräte brauchbare Resultate?
- In wie weit lassen es die Daten des MODIS-Satelliten zu, auf die Lufttemperatur zu schließen? Was können MODIS-Daten zur räumlichen Verteilung von urbanen Wärmeinseln sagen?
- Wie gut identifiziert der Erkennungsalgorithmus Slums? Wo treten Probleme auf? Worin könnten diese liegen?

## 1.3 Stand der Wissenschaft

Das Phänomen der urbanen Wärmeinseln (UHI) beschreibt den Lufttemperaturunterschied zwischen urbanen und ruralen Gebieten. Dieses Phänomen wurde bereits in großen Umfang untersucht (Tomlinson et al. 2012a). Oke (1988) gibt als Hauptgründe hierfür die Geometrie von Städten, sowie die Dichte, als auch die Bevölkerungszahlen von urbanen Räumen an. Traditioneller Weise wurde dies durch den Vergleich von urbanen und ruralen Wetterstationsdaten bestimmt (Karl et al. 1988). Die Messung entlang von Transekten ist eine weitere angewendete Methode (Torok et al. 2001). Fernerkundungsbasierte Daten können in situ Daten, wie beispielsweise Wetterstationen, ergänzen (Tran et al. 2006). Dies ist zudem sinnvoll, wenn die Verfügbarkeit von Wetterstationsdaten eingeschränkt ist. Fernerkundungsbasierte Temperaturmessungen liefern bessere Ergebnisse, als eine Interpolation von Stationsdaten (Mendelsohn et al. 2007; Cheval et al. 2009). Zur Bestimmung von Oberflächentemperaturen sind satellitenbasierte Daten von Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Landsat Thermal Mapper (TM), Landsat Enhanced Thermal Mapper Plus (ETM+), sowie von Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) verfügbar. Bei letzterem erfolgt die Aufnahme der täglichen und nächtlichen Oberflächentemperatur in den Bändern 20, 22, 23,

29 und 31-33 (mit einer Bandbreite von 3660 bis 13485 Mikrometer), mit einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer (NASA 2012). Der große Vorteil liegt in der zeitlichen Auflösung, MODIS nimmt die Daten zwei Mal täglich auf (10:30 Uhr und 22:30 Uhr) (Tomlinson et al. 2012a). MODIS ist seit 2000 in Betrieb, da aber die freie Verfügbarkeit von Daten erst seit kürzerer Zeit gegeben ist, ist die Zahl der verfügbaren Arbeiten, die speziell MODIS Daten verwenden, begrenzt (Tomlinson et al. 2012a). Tran et al. (2006) verwendeten MODIS Daten um UHIs in acht asiatischen Megastädten zu untersuchen. Kant et al. (2009) untersuchten den Einfluss von Landnutzung und Landbedeckung auf die Verteilung der Oberflächentemperatur in Dehli, Indien. Sie verglichen zudem die aus Satellitendaten abgeleiteten Oberflächentemperaturen mit Feldmessungen, die eine Genauigkeit von etwa  $\pm 3$  °C ergaben. Die Limitierung dieser Arbeit liegt jedoch darin, dass keine Daten für die Sommermonate Mai – Juni vorhanden waren (Kant et al. 2009). Zu dieser Zeit ist der Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Menschen jedoch am stärksten. Eine Validierung von MODIS-basierten Daten zu Oberflächentemperaturen wurden ebenfalls von Wang et al. (2008) durchgeführt, allerdings nur für Daten während der nächtlichen Überflüge. Cheval et al. (2009) untersuchten die UHI von Bukarest für den Monat Juli der Jahre 2000-2006. Diese betonen ebenfalls den hohen Nutzen der großen räumlichen Erfassung von fernerkundungs-basierten Daten. Der Zusammenhang zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur ist noch nicht vollständig verstanden „Indeed, a significant research gap that still exists is the relationship between measured surface temperature LST [...] and air temperature” (Tomlinson et al. 2012a, S.223). Hier gibt es auf jeden Fall noch weiteren Forschungsbedarf (Weng 2009; Tomlinson et al. 2012a).

Bezüglich der Detektion von Landnutzung ergeben sich mit der Inbetriebnahme von hochauflösenden Satelliten (Auflösung im 1-Meter Bereich) IKONOS (Inbetriebnahme: 1999), QuickBird (2001) und OrbView (2003) neue Anwendungsmöglichkeiten für satellitenbasierte Daten (Blaschke 2010). Geringer auflösende Aufnahmen lassen lediglich eine pixelbasierte spektrale Analyse zu, was bis dahin die gebräuchlichste Methode war. Durch die hochauflösenden Daten war es nun auch möglich objektorientierte Analysen durchzuführen. Objektorientierte Analysen sind besonders für urbane Räume von hohem Interesse, da diese komplexe Strukturen aufweisen und spektrale Unterschiede zu gering sind, um daraus ausreichende Informationen ziehen zu können (Myint & Lam, 2005). Myint et al. (2011) zeigten, dass eine Landbedeckungsklassifikation für urbane Strukturen durch objektbasierte Klassifikation signifikant bessere Ergebnisse erzielt als das, beispielsweise bei pixelbasierten Klassifikationen häufig angewendete, maximum-likelihood Verfahren. Auch Daten zu Siedlungsstrukturen, insbesondere auch zu informellen Siedlungen, können durch

hochauflösende Satellitendaten aufgenommen und analysiert werden. Die komplexen und kleinräumigen Strukturen von informellen Siedlungen erfordern höher aufgelöste Daten, als dies beispielsweise Landsat- Aufnahmen bieten. Besonders das Auftreten von „Mischpixeln“ bereitet bei der Analyse von urbanen Strukturen Schwierigkeiten (Bhaskaran et al. 2010). Trotz der hochauflösenden Daten sollten fernerkundungsbasierte Daten an Hand von vor Ort Kenntnissen validiert und kalibriert werden (Baud et al. 2010). Für die Identifikation von informellen Siedlungen verwendeten Kit et al. (2012) das Prinzip der Lakunarität. Das Konzept der Lakunarität wurde von Mandelbrot (1983) eingeführt. Lakunarität unterscheidet verschiedene Erscheinungsformen von Texturen und beschreibt insbesondere die Verteilung von Lücken (Myint & Lam, 2005). Lakunarität ist besonders zur Klassifikation von urbanen Strukturen geeignet, da diese nicht auf spektralen Eigenschaften beruht und somit nicht von individuellen Pixel Werten abhängig ist (Myint & Lam, 2005). Die Analyse von satellitenbasierten Daten mit Hilfe des Lakunaritätsansatzes wurde für urbane Räume sowohl in Entwicklungs- (Amorim et al. 2009; Barros Filho and Sobreira 2008; Kit et al. 2012) als auch in Industrieländern (Myint & Lam, 2005) angewendet.

## **2 Methode**

### **2.1 Auswahl des Untersuchungszeitraums für die Lufttemperaturmessungen**

Der Untersuchungszeitraum wurde anhand einer längeren meteorologischen Messreihe ausgewählt. Hierfür wurden die Daten einer offiziellen Wetterstation verwendet. Der Fokus wurde auf eine Zeit gelegt, zu der häufig Hitzewellen auftraten.

### **2.2 Verwendete Lufttemperaturmessgeräte**

Für die Kurzzeitlufttemperaturmessungen wurden zum einen elektronische Minimum-/Maximum-Thermometer (Min-/Max-Thermometer) verwendet. Diese mussten täglich abgelesen und die alten Werte gelöscht werden. Die Genauigkeit wird vom Hersteller mit  $\pm 1$  °C angegeben. Außerdem wurden auch Datalogger verwendet, die die Lufttemperatur alle 15 Minuten aufzeichneten. Diese erlaubten, die gemessenen Lufttemperaturen über einen längeren Zeitraum zu speichern. Damit wurde es möglich, die Temperaturkurven aufzunehmen um z.B. zu prüfen, ob die Maximaltemperatur nur ein kurzzeitiger Ausreißer war. Auch für diese Geräte betrug die Genauigkeit nach Herstellerangaben  $\pm 1$  °C. Der Preis für die Min-/Max-Thermometer betrug 5 € und für die Logger 34 €. Wegen des begrenzten Budgets waren die günstigen Anschaffungskosten ein wichtiger Grund dafür, diese Geräte auszuwählen. Des Weiteren bestand bei der durchgeführten Messkampagne die Gefahr von Diebstählen und es wurde auch diesem Grund auf günstige Geräte zurückgegriffen.

### **2.3 Bestimmung von Messfehlern**

Zur Bestimmung von Messfehlern wurde ein statistisches Verfahren verwendet. Die verwendeten Quellen und Algorithmen hierfür sind im Abschnitt „Ergebnisse“ anhand eines Messpunktes exemplarisch näher erläutert. Für alle weiteren Messpunkte ist dies in Appendix 1 dokumentiert. Zu einer weiteren Plausibilitätsprüfung wurden die Zeitreihen der einzelnen Messpunkte der Zeitreihe der Stationsdaten gegenübergestellt. Dadurch kann untersucht werden, ob die Trends an den Messpunkten dem Trend von Begumpet entsprechen. Dann wären die quantitativen Unterschiede von  $T_a$  eher durch räumliche Gegebenheiten und nicht durch etwaige Messfehler zu erklären. Diese Vorgehensweise ist an einem MP beispielhaft im Abschnitt Ergebnisse beschrieben. Für alle weiteren Messpunkte ist dies in Appendix 2 dokumentiert.

## 2.4 Slum Definition

Es gibt keine einheitlichen Definitionen für Slums. Im Glossar der Vereinten Nationen (UN) werden Slums als „areas of older housing that are deteriorating in the sense of their being underserviced, overcrowded and dilapidated“ (UN 2011) bezeichnet. Im Gegensatz zu dieser recht weit gefassten Definition bestimmt das UN Habitat (UN 2007) Slums über das Fehlen einer dieser Kriterien:

- Zugang zu Trinkwasser
- Zugang zu Sanitäreanlagen
- ausreichender Wohnraum
- dauerhafter Wohnraum
- gesicherte Besitzverhältnisse des Wohnraums

In Indien wird die Definition nach dem Census 2001 (Census of India 2001) angewendet. Dieser nennt folgende Kriterien:

- alle Gebiete, die von der staatlichen oder lokalen Regierung, nach dem Slumgesetz, als Slum bezeichnet werden
- alle Gebiete, die von der staatlichen oder lokalen Regierung oder Behörden als Slum identifiziert werden, aber nicht durch das Slumgesetz definiert wurden
- dicht besiedelte Gebiete mit mindestens 300 Bewohnern oder 60-70 Haushalte, die in ärmlichen Behausungen unter unhygienischen Bedingungen mit unangemessener Infrastruktur und fehlendem Zugang zu Trinkwasser und Sanitäreanlagen leben

Darüber hinaus wird noch zwischen pucca- und kutcha-artigen Behausungen unterschieden. Kutcha sind ausschließlich einstöckig und ähneln Zelten. Sie bestehen beispielsweise aus Lehm, Holz oder Pappe. Pucca sind Häuser aus Steinen oder metallischen Materialien. Diese können auch mehrere Stockwerke haben (Baltsavias und Mason 1997).

## 2.5 Kriterien der Slumerkennung

Um ein Gebiet als Slum zu charakterisieren, wurden mehrere Kriterien herangezogen. Eines dieser Kriterien war die Struktur der Gebäude, sowie die Abstände zwischen den Gebäuden. Laut Barros Filho & Sobreira (2008) sind kleine Abstände zwischen Gebäuden ein häufig anzutreffendes Element in der Struktur von Slums. Auch wurden die Gebäudetypen klassifiziert. Hierfür wurde zum einen nach pucca und kutcha unterschieden (Baltsavias und Mason 1997) zum anderen wurde der von Baud et al. (2010) definierte Typ „basic built-up“

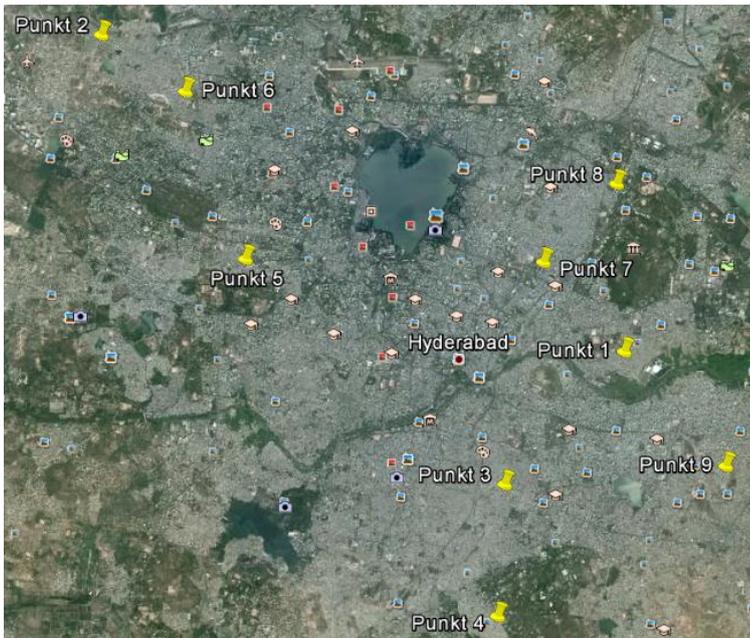
als Unterscheidungsmerkmal gewählt. Des Weiteren kann durch ein gewundenes Straßennetz und eine unregelmäßige Gebäudeanordnung auf informelle Siedlungen geschlossen werden (Amorim et al. 2009). Auch eine Breite der Zugangsstraßen von weniger als 3 Metern wird als Merkmal für informelle Siedlungen angegeben (Baud et al. 2010). Weitere Kriterien sind der Zugang bzw. der fehlende Zugang zu Trinkwasser und Sanitäranlagen (UN 2006).

## **2.6 Slumerkennungsalgorithmus und Auswahl der Untersuchungsgebiete**

Im Projekt „Sustainable Hyderabad“ wurde ein Erkennungsalgorithmus zur Identifikation von Slums entwickelt. Dieser wurde auf eine QuickBirdszene angewendet. Die Sensoren des QuickBirdsatelliten nehmen im multispektralen und im panchromatischen Bereich auf. Die Auflösung beträgt 2,44-2,88 m bzw. 0,61-0,72 m, dies hängt von dem Winkel des off-nadir ab (Cheng et al. 2003). Eine Stadt stellt eine äußerst heterogene Oberfläche dar, die eine Vielfalt von Objekten und Objektclustern beinhalten kann. In Städten sind unterschiedlichste Merkmale wie z.B. Grünflächen oder Straßen, aber auch Siedlungsstrukturen mit individuellen räumlichen Eigenschaften vorzufinden. Diese ermöglichen einen hohen Grad der Automatisierung der Landnutzungsklassifizierung in der Stadt.

Malhi and Román-Cuesta (2008) schlugen vor, die Lakunarität als Maß der räumlichen Heterogenität einer Oberfläche zu verwenden, um Slums in Recife/Brasilien mit Hilfe von hochauflösenden Satellitenbildern zu identifizieren. Lakunarität gehört zu den Methoden der fraktalen Mathematik und charakterisiert die Lückenhaftigkeit einer Oberfläche. Anders gesagt, Lakunarität liefert eine Möglichkeit die innere Struktur eines Bildes quantitativ zu beschreiben. Die Autoren der ursprünglichen Methode haben darauf hingewiesen, dass die Art und Weise der Bebauung in Slumvierteln einer bestimmten Spanne von Lakunaritätswerten entspricht und dadurch eine Slum-Signatur darstellt. Diese Methode wurde von Kit et al. (2012) weiterentwickelt und an die Stadt Hyderabad angepasst. Die Änderung der Methode bestand aus der Entwicklung eines Datenvorbereitungsverfahrens, das auf den Canny-Kantendetektor zurückgreift, sowie aus der spezifischen Parametrisierung der Lakunaritätsformel, mit dem Zweck, die Formel an die Besonderheiten von indischen Slums anzupassen. Der Canny-Kantendetektor ermöglicht es, Linien bzw. Kanten von Gebäuden zu erkennen (Canny 1986). Dadurch ist es möglich, Gebäude und Lücken auf einem Satellitenbild zu identifizieren. Hierauf basierend können nach den entsprechenden Lakunaritätswerten Slums erkannt werden. Für weitere Details des Algorithmus sei auf Kit et al. (2012) verwiesen.

Da es für einen Satelliten grundsätzlich nur möglich ist, optische, baustrukturelle Merkmale eines Slums zu erkennen (besonders kleine und dichte Häuser, enge Gassen usw.), ist diese Methode selbstverständlich nicht in der Lage, alle Slums in Hyderabad korrekt zu identifizieren, da z.B. die Bewohnerdichte eines Gebäudes nicht direkt identifizierbar ist. Nichtsdestotrotz wird von Kit et al. (2012) angegeben, dass die Methode für die Verschaffung eines Überblicks und für eine schnelle Abschätzung der Slumsituation in einer Stadt geeignet sei. Um zu überprüfen, ob der Algorithmus Slums richtig klassifiziert hat, wurden für die Feldkampagne neun Punkte vorausgewählt, die einen weiten Bereich von unterschiedlichen Baustrukturen abdecken, soweit dies auf den QuickBirdszenen erkennbar war. Am Boden wurden dann in den entsprechenden Gebieten georeferenzierte Fotos aufgenommen und Beobachtungen festgehalten. Die Merkmale dieser Gebiete nach der oben diskutierten Slumklassifikation sind in Tabelle 6 dargestellt (siehe Kapitel 4.4.9). Einen Überblick über die Lage der untersuchten Gebiete liefert Abb. 1.



**Abbildung 1: Überblick über die untersuchten Gebiete**  
(Quelle: QuickBird Szene aus dem Bestand des PIK)

### 3 Datengrundlage

#### 3.1 Wetterdaten der Station Begumpet

Die einzige offizielle Wetterstation (Indian Meteorological Department) in Hyderabad ist die Station Begumpet. Diese befindet sich am alten, sich nicht mehr in Betrieb befindlichen Flughafen, der im Norden der Stadt gelegen ist. Die Station befindet sich auf einer Freifläche und in größerem Abstand zu anderen Gebäuden. Damit sind die Daten dieser Wetterstation die einzigen verfügbaren Daten, die nach dem Idealfall einer amtlichen Wetterhütte erhoben werden.

Mit der prognostizierten Zunahme von Hitzewellen für die Region (Lüdeke, 2010) wird es relevant, welche Gebiete in Hyderabad davon besonders betroffen sein werden. In der vorliegenden Arbeit sollen unterschiedliche Möglichkeiten verglichen werden, urbane Wärmeinseln in Hyderabad zu identifizieren. Da die Untersuchung während einer möglichst heißen Periode durchzuführen ist, wurde der beste Beobachtungszeitraum anhand der Analyse von langjährigen Zeitreihen der Wetterstation Begumpet bestimmt. Es lagen tägliche Daten zur maximalen Lufttemperatur ( $T_{a \max}$ ) und zur minimalen Lufttemperatur ( $T_{a \min}$ ) für den Zeitraum 1997-2007 vor (Quelle: xDat 2012).

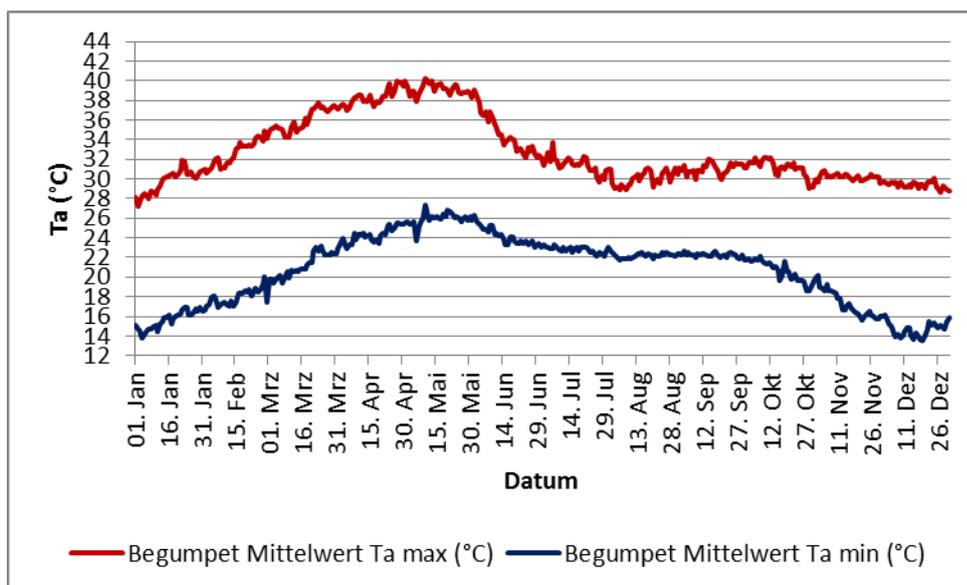
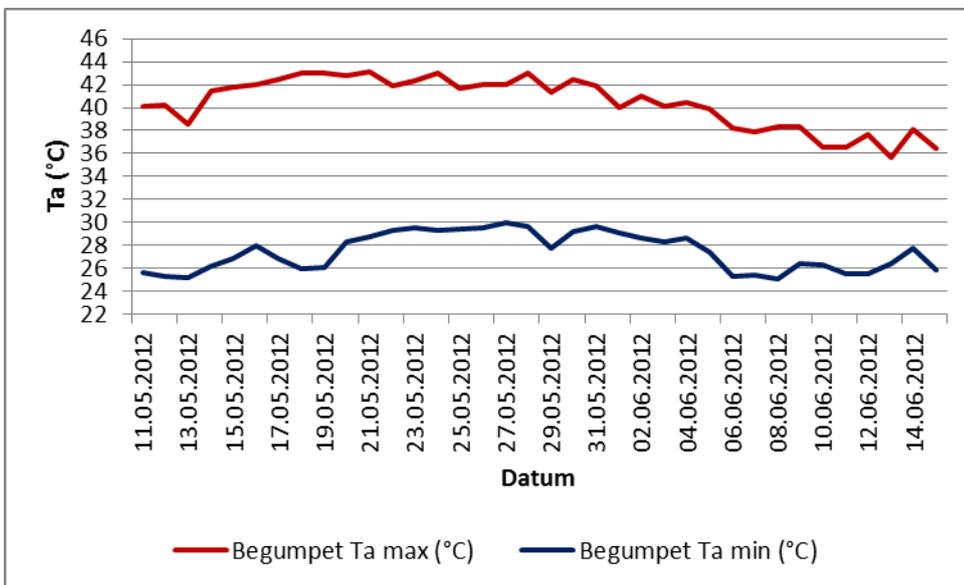


Abbildung 2: mittlerer Jahresgang von  $T_{a \max}$  und  $T_{a \min}$  an der Station Begumpet 1997-2007. (Quellen und verwendeter Algorithmus: siehe Text.)

Für jeden Kalendertag wurde der Mittelwert der Messwerte jeweils für ( $T_{a \max}$ ) und ( $T_{a \min}$ ) über die vorliegenden 10 Jahre gebildet und in Abb. 2 dargestellt. Besonders hohe Werte für

$T_{a \max}$  treten ab Ende April auf, ein Rückgang von  $T_{a \max}$  ist ab Anfang Juni zu verzeichnen. Auch für  $T_{a \min}$  ist ein ähnlicher Verlauf zu beobachten. Die niedrigsten Werte der Lufttemperatur ( $T_a$ ) treten in den Monaten November bis Februar auf. Um die Jahreswende beginnt  $T_a$  wieder anzusteigen (Abb. 2).

Um die Wettersituation während des Feldaufenthalts in Hyderabad einordnen zu können, wurde der Verlauf von  $T_{a \max}$  und  $T_{a \min}$  an der gleichen Station vom 11.05.2012 bis 14.06.2012 dargestellt (Abb. 3). Als Datenquelle für die aktuellen Tagestemperaturdaten der Begumpetstation während des Feldaufenthalts diente die Internetplattform [wetteronline.de](http://wetteronline.de) (2012). Hierbei fällt auf, dass  $T_{a \max}$  während der ersten Hälfte des Aufenthaltes besonders hohe Werte aufwies: während im langjährigen Mittel  $T_{a \max}$  kaum mehr als 40 °C beträgt, lag die Tagesmaximaltemperatur während des Aufenthaltes von Mitte Mai bis Anfang Juni sehr häufig über 42°C.



**Abbildung 3: Verlauf von  $T_{a \max}$  und  $T_{a \min}$  der Station Begumpet zur Zeit des Aufenthaltes.**  
(Quellen und verwendeter Algorithmus: siehe Text.)

Für  $T_{a \min}$  sind in diesem Zeitraum ebenfalls über dem langjährigen Mittel liegende Werte zu verzeichnen. Teilweise betrug  $T_{a \min}$  30 °C. Im langjährigen Mittel liegt dieser Wert zwischen 24 und 26 °C (Abb. 2). Während des letzten Drittels des Aufenthaltes nahm  $T_{a \max}$  ab. Ein Rückgang ist in diesem Zeitraum auch für  $T_{a \min}$  zu verzeichnen. Allerdings ist der Rückgang für  $T_{a \min}$  weniger stark ausgeprägt als für  $T_{a \max}$ . Der Verlauf sowohl von  $T_{a \max}$  als auch von  $T_{a \min}$  während des Aufenthaltes zeichnen sich als typisch im Vergleich zum langjährigen Verlauf aus. Sehr hohe Werte von  $T_{a \max}$  und  $T_{a \min}$  im Mai und ein Rückgang gegen Ende Mai/Anfang Juni sind charakteristisch für diese Jahreszeit in Hyderabad. Allerdings zeigten sowohl  $T_{a \max}$  als auch  $T_{a \min}$  höhere Werte (ca. 2 °C) als im langjährigen Mittel.

### 3.2 Auswahl der Messgebiete

In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, ob die aus MODIS-Daten generierte Oberflächentemperatur ( $T_O$ ) ein brauchbares Maß ist, um auf  $T_a$  zu schließen. In der Literatur konnten Hinweise gefunden werden, dass es einen nutzbaren Zusammenhang zwischen  $T_a$  und  $T_O$  geben könnte (Tomlinson et al. 2012b). Deshalb wurden vor dem Feldaufenthalt potentielle Orte für Messpunkte anhand von MODIS-Daten ausgewählt, mit dem Ziel Kandidaten für sich aufheizende oder eher kühl bleibende Gebiete zu erhalten. Die Messungen stellen dann einen Test dieser Hypothese dar.

Hierfür wurden aus der langjährigen Temperaturdatenreihe der Station Begumpet Tage mit  $T_{a\max} \geq 42$  °C herausselektiert, um Hitzewellen-Perioden zu identifizieren. Für diese Tage wurden Satellitenbilder von MODIS für das Stadtgebiet untersucht, wobei in Quantum GIS (QGIS) ein Farbschema von 32 °C - 56 °C erstellt wurde, welches  $T_O$  in 1 °C Schritten darstellt. Anschließend wurde jedes Satellitenbild einzeln eingeblendet und die heißesten Pixel mit einem Punkt markiert. Anschließend wurde eine Karte der Stadt Hyderabad in QGIS eingefügt. Durch die erstellten Punkte war zu sehen, an welchen Orten der Stadt  $T_O$  während eines Extremereignisses besonders hoch ist. Um Ansammlungen von mehreren Punkten an einem Ort wurden Polygone erstellt. Anhand einer QuickBird Szene konnten vorab einige größere homogene Freiflächen, welche sich aufgrund ihrer dunklen Oberflächenfarbe besonders aufheizen (z. B.: Flughafen, Militärgelände) herausselektiert werden. Zudem wurden Flächen markiert, die während Hitzewellen eine sehr niedrige  $T_O$  aufwiesen.

### 3.3 Auswahl der Messpunkte

Es gelang während des Feldaufenthalts Thermometer in den meisten der vorausgewählten Gebiete zu installieren. Im Folgenden wird geschildert, was bei der Anbringung zu beachten ist.

Neben trivialen Fehlern in der Messung der Lufttemperatur, wie etwa falscher Ablesung, Alterung der Geräte, sind Strahlungsfehler die häufigste Ursache für nicht verwendbare Messwerte (Häckel 2012). Da jedes Thermometer nur seine eigene Temperatur misst, soll das Thermometer auf die gleiche Temperatur wie die Luft gebracht werden. Um Strahlungsfehler zu vermeiden wurden sogenannte Wetterhütten oder auch englische Hütten entwickelt (Abb.4). Diese sind weiß lackiert und sind rundum mit pagodenförmig angeordneten Jalousien umgeben, dadurch soll der Einfluss von fehlergenerierender Ein- und Abstrahlung

verhindert werden, zudem sollen diese auch luftdurchlässig sein (Häckel 2012). Einen weiteren Einflussfaktor stellt der Erdboden als Energieumsatzfläche dar. Aus diesem Grund wurde eine Standardmesshöhe von 2 m über Grund über kurz geschnittenem Gras festgelegt (Häckel 2012).



**Abbildung 4: Wetterhütte**  
(Quelle: Häckel 2012)

Da dieser Idealfall während der Datenerhebung in einem eng bebauten und heterogenen Stadtgebiet nicht realisierbar war, wurde versucht diesem weitestgehend nahezukommen. Da der Einfluss der direkten Strahlung auf die Messung der Lufttemperatur am stärksten ist, wurde versucht, diesen durch die Anbringung der Thermometer an beschatteten Stellen weitestgehend auszuschließen. Die Thermometer wurden teilweise in Bäumen oder Sträuchern angebracht um den Schatten der Vegetation zu nutzen. Die hier möglicherweise auftretende Transpirationskühlung muss dann allerdings typisch für die zu charakterisierende Gegend sein. Eine weitere Möglichkeit zur Anbringung der Thermometer war, diese im Schatten von Gebäuden oder unter - als Sonnenschutz dienenden - Planen zu befestigen. Auch wurde versucht, die Thermometer möglichst in 2 m über Grund anzubringen. Im Folgenden seien exemplarisch die Messpunkte (MP) 9 und 7 beschrieben. Das Thermometer an Messpunkt 9 wurde an einem Baum in etwa 1,9 m Höhe über Grund befestigt. Der Baum befand sich am Rand einer Straße und war etwa 3 m von dem nächst gelegenen Gebäude entfernt. MP 7 wurde auf dem Dach eines Straßenstandes befestigt. Eine nahe gelegene, nach Norden exponierte Mauer und eine Plane sorgten hier für die gewünschte Beschattung. Zur Zeit des Feldaufenthaltes, war der Sonnenhöchststand im Norden (Hyderabad liegt südlich des nördlichen Wendekreises).



Abbildung 5: Messpunkt 9.  
(Quelle: eigenes Foto)



Abbildung 6: Messpunkt 7 (der Pfeil verweist auf das Thermometer) (Quelle: eigenes Foto)

Außer dem Versuch dem Idealfall einer Wetterhütte möglichst nahezukommen, gab es auch organisatorische Aspekte zu beachten. Hier ist vor allem die Erlaubnis, Thermometer anbringen zu dürfen, zu nennen. Auch eine möglichst verdeckte oder sichere Anbringung war zu beachten, um die Gefahr eines möglichen Diebstahls gering zu halten. Trotzdem wurden ein Datenlogger und drei Min/Max-Thermometer gestohlen.

In Abbildung 7 ist zusammenfassend dargestellt, wo im Stadtgebiet von Hyderabad Thermometer installiert werden konnten.

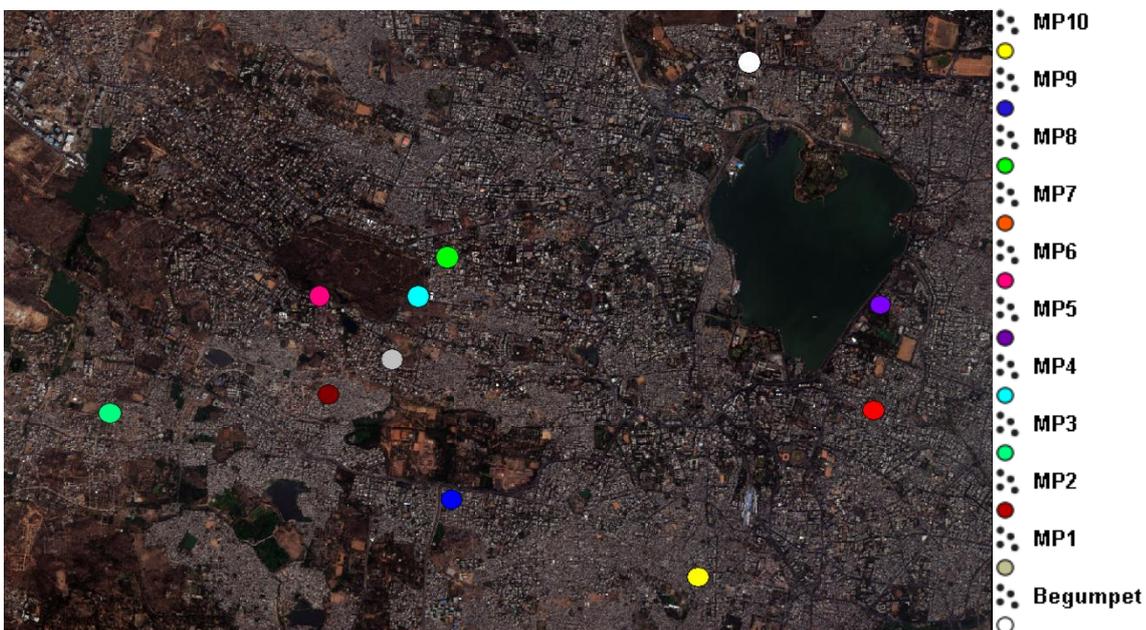


Abbildung 7: Lage der Messpunkte auf einem Satellitenbild von Hyderabad  
(QuickBird Szene aus dem Bestand des PIK)

### 3.4 Daten des MODIS Satelliten

Um mit regelmäßig aufgenommenen Oberflächentemperaturdaten arbeiten zu können, wurden die Messungen von MODIS genutzt. MODIS, oder auch “Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer”, ist ein optomechanisches Scannersystem und befindet sich auf den

Satelliten Terra und Aqua, welche am 18. Dezember 1999 und am 4. Mai 2002 von der NASA in ihre Umlaufbahn in einer Höhe von 705 Kilometer gebracht wurden (NASA). Die Satelliten befinden sich in einer Sonnen-synchronen, polaren Umlaufbahn und nehmen zu jedem Punkt auf der Erde zweimal täglich, um 10:30 Uhr sowie um 22:30 Uhr, Daten auf (Tran et al. 2006). MODIS liefert Daten in 36 Spektralbändern im Bereich von 0,4 bis 14,4 Mikrometer. Für die Aufnahme der täglichen und nächtlichen Oberflächentemperatur wurden die Bänder 20, 22, 23, 29 und 31-33 (mit einer Bandbreite von 3660 bis 13485 Mikrometer), mit einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer sowie einer zeitlichen Auflösung von acht Tagen, für alle Flächentypen, verwendet. Bei Bewölkung können keine Daten zur Oberflächentemperatur erhoben werden. Die radiometrische Auflösung von MODIS beträgt 12 bit (NASA).

Auf der Internetseite des U.S. Geological Survey (USGS) erhält man die MODIS-Daten für die gesamte Erdoberfläche. Mittels einer Karte, die sowohl horizontal als auch vertikal unterteilt ist, horizontal von h00 bis h35 und vertikal von v00 bis v17, wählt man die gewünschte Region aus und erhält einen kurzen Zahlencode, in diesem Fall "h25v07", welcher Indien sowie Teile des Indischen Ozeans umfasst, für welchen Daten seit Aufnahmebeginn erfasst werden können. Heruntergeladen und in ein Geoinformationssystem (GIS) eingefügt, werden die Daten konvertiert, wodurch man 11 Datenpaare erhält. Diese beinhalten globale Attribute (Metadaten), Informationen zur Produktion, Archivierung, und Geolokation beinhaltend, und wissenschaftlichen Datasets mit lokalen Attributen (Zhou, 2012). Aus diesem Paket können die benötigten Daten, wie die tägliche und nächtliche Oberflächentemperatur, selektiert werden. Mittels „Calculator“ werden die Daten in GIS mit einem Faktor multipliziert, erhältlich in den Metadaten, und falls gewünscht, von Kelvin in Grad Celsius umgerechnet.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Interpretation der Messergebnisse

Um Messfehler aus den  $T_a$  Messungen herauszufiltern wurde ein statistisches Verfahren angewendet. Hierzu wurden die Ergebnisse jedes Messpunktes mit den  $T_a$  Daten der Wetterstation Begumpet verglichen. Es wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Als unabhängige Variable wurden die Begumpet-Daten verwendet, die abhängige Variable wird durch die Messungen am jeweiligen Messpunkt beschrieben. Außerdem wurden die Residuen berechnet, die die Differenz zwischen der abhängigen Variablen und der durch die Regression erwarteten Werten angeben. Anschließend wurde deren Standardabweichung ( $\sigma$ ) berechnet. Laut Lohninger (2012) sind Werte, die mehr als die 2,5-fache Standardabweichung abweichen, als Ausreißer anzusehen. Die so errechneten Ausreißer wurden aus den erhobenen  $T_a$  Werten herausgefiltert. Die beschriebene Vorgehensweise ist in Abb. 8 exemplarisch dargestellt und führt in diesem Fall zum Verwerfen einer Messung. Für die anderen Messpunkte ist dies in Appendix 1 dokumentiert.

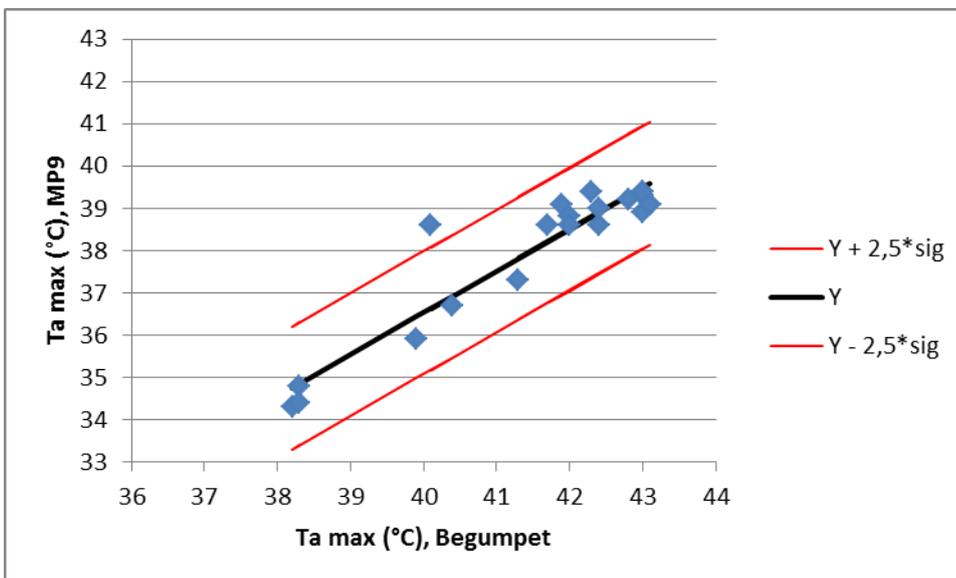
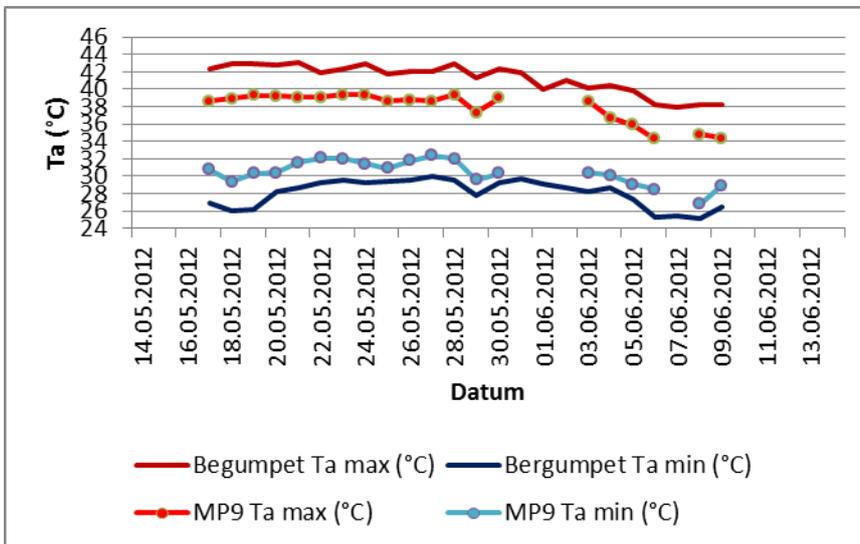


Abbildung 8: Regressionsgerade und 2.5- $\sigma$ -Korridor für MP9  
(Quellen und Algorithmus: siehe Text)

Zur weiteren qualitativen Plausibilitätsprüfung der  $T_a$  Messungen wurden die MP-Zeitreihen der Zeitreihe der Begumpet Stations-Daten gegenübergestellt, wobei die von Ausreißern bereinigten Messdaten verwendet wurden. Durch die zu erkennenden Trends im Temperaturverlauf soll untersucht werden, ob die Verläufe von  $T_a$  an den jeweiligen Messpunkten qualitativ mit denen an der Station Begumpet übereinstimmen. Dann wären die quantitativen Unterschiede von  $T_a$  eher durch räumliche Gegebenheiten und nicht durch

etwaige Messfehler zu erklären. Hier sei exemplarisch der Messpunkt 9 ausgewählt (Abb. 9). Für die anderen Messpunkte ist dies in Appendix 2 dokumentiert.



**Abbildung 9: Vergleich von Ta für MP 9 und Begumpet**  
(Quellen: siehe Text)

An diesem Beispiel (Abb. 9) kann man ebenso wie an den im Appendix 2 dokumentierten Zeitreihen erkennen, dass die in Begumpet gemessenen Verläufe qualitativ (Trends und Trendwechsel) recht gut an den Messpunkten reproduziert werden – ein starker Hinweis auf die Validität der Messungen.

Der beschriebene Vergleich kann darüber hinaus dahingehend interpretiert werden, ob ein Messpunkt, bezogen auf die Begumpetstation, in einem heißeren oder kühleren Gebiet liegt. Hierzu wurden täglich die Differenzen zwischen den jeweiligen MPs und den Begumpet-Daten bestimmt und dann deren Mittelwerte gebildet.

Um ein Maß dafür zu erhalten, wie repräsentativ diese Mittelwerte für den Temperaturunterschied zwischen der Begumpetstation und den MPs sind, wurde der Standard Fehler des Mittelwertes berechnet (Taylor 1997). Hier wird zunächst die Standardabweichung ( $\sigma$ ) errechnet. Diese erhält man aus der Summe der Abweichungsquadrate vom Mittelwert durch die Anzahl der Messungen minus 1. Aus diesem Ergebnis wird dann die Quadratwurzel gezogen.

Um den Standardfehler des Mittelwertes zu erhalten, wird die Standardabweichung durch die Quadratwurzel aus N geteilt (Taylor 1997). Wählt man nun den 2-fachen Standardfehler als Fehlermarge für den Mittelwert, kann man mit 95.4%iger Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass der Mittelwert für eine sehr lange Messreihe mit den gleichen statistischen Eigenschaften in diesem Bereich liegt. (Taylor 1997).

Darüber hinaus kann aufgrund der vom Hersteller der Thermometer angegebenen Genauigkeit von  $\pm 1$  °C auch ein möglicher systematischer, geräteabhängiger Fehler berücksichtigt werden. Taylor (1997) gibt als Abschätzung für den Gesamtfehler folgende Berechnung vor: die Quadrate des zufälligen und des systematischen Fehlers werden addiert, dann wird aus dieser Summe die Quadratwurzel gezogen. Die genannten Fehlerabschätzungen können nun verwendet werden, um die Sicherheit von Aussagen wie: “bezüglich der Tagesmaximaltemperatur ist der Messpunkt 2 wärmer als die Begumpetstation“ zu charakterisieren.

Um einen Überblick über die Charakteristika der verschiedenen MPs zu erhalten wurden diese zusammenfassend in Tab. 1 dargestellt. Hier wurden neben den eben erwähnten Vergleichen zu den Begumpet-Stationsdaten auch weitere Parameter eingetragen, wie die Zeiträume der Messungen, die Anzahl der Messungen und die geographischen Koordinaten der Messpunkte. Die Angabe zur Höhe über Grund zeigt, inwieweit es gelang, der Höhe in Wetterhütten möglichst nahe zu kommen. Die Angabe der Entfernung zum Hussain Sagar (ein großer See in der Mitte der Stadt) soll den möglichen Einflusses eines Gewässers überprüfbar machen. Die Angabe zum Abstand von Gebäuden soll den möglichen thermischen Einfluss dieser Größe berücksichtigen. Dem Idealfall, Messungen der Lufttemperatur möglichst auf einer Rasenfläche durchzuführen, war bei einer in der Stadt durchgeführten Messkampagne nicht zu entsprechen. Allerdings können die Messungen, die notwendigerweise in der Nähe von Gebäuden stattfinden müssen, für einen größeren Raumbereich als repräsentativ angesehen werden, insbesondere da diese teilweise in sehr dicht besiedelten Gebieten durchgeführt wurden.

Um zu verdeutlichen, dass der (in allen Fällen sorgfältig gewählte) Aufhängepunkt keinen verfälschenden Einfluss hat, seien hier die MP 9 und 10 diskutiert. Bei beiden MPs wurden die Thermometer in Bäumen angebracht und beide befanden sich in nur geringerem Abstand zu Gebäuden. Während MP 9 eine deutliche geringere  $T_{a \max}$  als die Station Begumpet aufweist, ist für MP 10 eine höhere  $T_{a \max}$  als an der Station festzustellen. Auch der Vergleich zwischen zwei anderen Messpunkten mit ähnlichen Charakteristika, auf dem Dach eines Straßenstandes (MP7) und auf dem Dach eines einstöckigen Geschäftes (MP8) zeigen, dass der Einfluss des Aufhängepunktes nicht bestimmend ist. MP 7 weist sowohl für  $T_{a \max}$  als auch für  $T_{a \min}$  höhere Werte als an der Station Begumpet auf. Im Gegensatz dazu weist  $T_{a \max}$  für MP 8 niedrigere Werte als  $T_{a \max}$  in Begumpet auf.  $T_{a \min}$  zeigt am MP 8 höhere Werte als dies in Begumpet der Fall ist.

Die MPs 1, 2, 6, 7 und 10 zeigen für  $T_{a \max}$  im Mittel höhere Werte als an der Station Begumpet, wobei dies für die MPs 1 und 2 sehr sicher und für MP 10 zu etwa 90% sicher ist. Die restlichen MPs weisen geringere Sicherheiten auf. Die MPs 3, 4, 5, 8, 9 zeigen einen niedrigeren Mittelwert für  $T_{a \max}$  als in Begumpet, wobei diese Aussage nur für MP 8 unsicherer als 95.4% ist.

Der Mittelwert  $\Delta T_{a \min}$  ist lediglich an MP 6 negativ, allerdings nur mit geringerer Sicherheit. An allen weiteren MPs hat der Mittelwert für  $T_{a \min}$  höhere Werte als in Begumpet, wobei dies für die MPs 2,3,8 und 9 sehr sicher ist, während die restlichen Mittelwerte (MPs 1, 4, 5, 10) nicht das 95,4%-Kriterium erfüllen.

**Tabelle 1: Charakteristika der Messpunkte. Zur Definition der Fehlermaße: siehe Text.**

Messpunkt	Beginn der Messung	Ende der Messung	Anzahl der Messungen	Mittelwert $\Delta T_{a \max}$ (°C)	Stat. Fehler	Gesamt-Fehler	Mittelwert $\Delta T_{a \min}$ (°C)	Stat. Fehler	Gesamt – Fehler
1	23.05.2012	09.06.2012	17	3,45	0,77	1,26	0,16	0,49	1,12
2	04.06.2012	09.06.2012	6	1,68	0,63	1,18	5,18	0,51	1,12
3	03.06.2012	06.06.2012	4	-1,98	0,69	1,22	4,93	0,07	1,00
4	23.05.2012	27.05.2012	5	-2,08	0,37	1,06	0,60	0,29	1,04
5	30.05.2012	09.06.2012	10	-2,14	0,98	1,40	0,27	0,65	1,19
6	21.05.2012	03.06.2012	11	0,80	1,04	1,44	-0,42	0,87	1,33
7	15.05.2012	14.06.2012	30	0,63	0,97	1,39	3,09	0,56	1,15
8	14.05.2012	08.06.2012	25	-0,22	0,38	1,07	1,62	0,36	1,06
9	17.05.2012	09.06.2012	21	-3,59	0,17	1,02	2,41	0,36	1,06
10	30.05.2012	14.06.2012	16	1,25	0,98	1,40	0,77	0,32	1,05

Messpunkt	Höhe über Grund (m)	Abstand zu Gebäuden (m)	Abstand zu Hussain Sagar (m)	geogr. Breite	geogr. Länge
1	1,5	0,5	4453	17°24'37.51"N	78°25'30.02"E
2	2	Messpunkt am Gebäude	5354	17°24'21.75"N	78°25'3.46"E
3	2	Messpunkt am Gebäude	8021	17°24'13.51"N	78°23'30.38"E
4	1,5	141	4144	17°25'3.17"N	78°25'41.14"E
5	1,7	67	178	17°25'1.54"N	78°28'57.52"E
6	1,4	76	5348	17°25'2.96"N	78°24'59.19"E
7	2	0,4	873	17°24'18.35"N	78°28'55.25"E
8	2,3	0,5	3625	17°25'19.68"N	78°25'52.98"E
9	1,9	3	4596	17°23'39.67"N	78°25'56.20"E
10	2,2	4	2980	17°23'8.70"N	78°27'41.26"E

Messpunkt	Charakteristikum
1	auf dem Dach eines Gebäudes von einem Baum beschattet
2	an einem Geschäft , beschattet durch Vordach und Markise
3	an einem Geschäft , beschattet durch Vordach
4	auf dem Mittelstreifen einer größeren Straße, in einem Strauch befestigt, durch Strauch beschattet
5	in einem Park, in einem Strauch befestigt, durch Strauch beschattet
6	am Rande eines Parks, in einem Strauch befestigt, durch Strauch beschattet
7	auf dem Dach eines Straßenstandes, durch eine Mauer und eine Plane beschattet
8	auf dem Dach eines einstöckigen Geschäftes, von einem 0,5 m entfernten Baum beschattet
9	auf einer Straße in einem Wohngebiet, in einem Baum befestigt
10	in einem Baum, sehr dicht besiedeltes Wohngebiet (slumartig)

Die beiden Messpunkte 2 und 10, die sowohl für  $\Delta T_{a \max}$  als auch für  $\Delta T_{a \min}$  positive Werte aufwiesen, befanden sich in dicht bebauten Gebieten. MP 2 befand sich in einem Gebiet das durch visuelle Interpretation von QickBird-Daten als besonders dicht bebaut aufgefallen war, auch die Umgebung von MP 10 weist eine hohe Bebauungsdichte auf. MP 1 wies für  $T_{a \max}$  einen deutlich höheren Mittelwert als Begumpet auf. Für  $T_{a \min}$  war dieser Wert nur leicht positiv und kleiner als die anzunehmende Fehlermarge. MP 1 befand sich auf dem Dach eines Gebäudes. Die gemessenen Werte der Lufttemperatur lassen sich dadurch erklären, dass sich das Dach tagsüber stark aufheizen kann (das Thermometer war wie bereits erwähnt im Schatten angebracht). Nachts kann hier eine hohe effektive Abstrahlung stattfinden, wodurch sich erklären lässt, dass hier ähnliche Werte wie für Begumpet auftraten. MP 4 und MP 5 wiesen für  $\Delta T_{a \max}$  negative Werte auf und für  $\Delta T_{a \min}$  waren diese Werte nur leicht positiv, wobei MP 5 für  $T_{a \min}$  mit Vorsicht zu interpretieren ist. MP 5 befand sich in einem Park und MP 4 auf dem Mittelstreifen einer größeren Straße. MP 5 war zudem in der Nähe von Hussain Sagar, hier spielt möglicherweise auch der kühlende Einfluss von Gewässern eine Rolle. Beide Messpunkte haben gemeinsam, dass sie in größerer Entfernung zu Gebäuden liegen. Bei MP 4 sei noch erwähnt, dass die Straße auf der sich dieser Messpunkt befand, an einem größeren Park vorbei führt. MP 6 befand sich ebenfalls in einem Park und wies um  $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$  höhere Mittelwerte für  $T_{a \max}$  als die Stationsdaten auf, allerdings zeigte dieser Messpunkt niedrigere Mittelwerte für  $T_{a \min}$  auf als die Wetterstation. MP 6 ist mit Vorsicht zu interpretieren, da die Fehlermarge im Bereich des Mittelwertes liegt. Es sei noch erwähnt, dass MP 6 sich am Rande eines Parks befand, somit befand sich dieser Messpunkt auch in der Nähe einer Straße. Besonders aus MP 5 und 4 lässt sich vermuten, dass größere Freiflächen und/oder das Vorhandensein von Vegetation einen kühlenden Effekt auf die Umgebung haben. MP 3 war an einem Gebäude unter einem Vordach befestigt. Das deutlich höhere Mittel für  $T_{a \min}$  kommt mutmaßlich durch die hohe Wärmespeicherkapazität von Gebäuden zustande. Auch für die Differenzen der Mittelwerte zu Begumpet nehmen für die MPs 7, 8, 9 positive Werte an. Bei allen drei genannten MPs dient eine hohe Bebauungsdichte und somit der Einfluss der hohen Wärmespeicherkapazität als naheliegende Erklärung. Die Unterschiede zu Begumpet für  $T_{a \max}$  für MP 7 und 8 sind wegen der Fehlermarge mit Vorsicht zu betrachten. Für MP 7 findet man ein hohes Höhen/Breitenverhältnis in der Umgebung. Einige höhere Gebäude im Verhältnis zu einer recht schmalen Straße könnten dazu beitragen, dass nur wenig direkte Strahlung auf diese Straße trifft, möglicherweise der Grund, dass die Erwärmung tagsüber hier nur schwer belegbar ist, d.h. dass die Wahrscheinlichkeit einer Abkühlung auch recht groß ist. Zu MP 8 sei erwähnt, dass tagsüber die Beschattung eines Baumes und Transpirationskühlung sowie gute Belüftung an diesem MP, der sich an einer

größeren Straße befindet, möglicherweise erklären, warum sich der gemittelte  $T_{a \max}$  Wert kaum von Begumpet unterscheidet. Die negativen Werte für  $\Delta T_{a \max}$  an MP 9 kommen möglicherweise vom Vorkommen vieler Bäume in der Umgebung und somit einer großflächigen Beschattung und Transpirationskühlung zu Stande.

Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zusammenfassend dargestellt. Hier werden die Art des Gebietes, die Erwartung für  $T_{a \max}$  bzw. für  $T_{a \min}$  die die Auswahl bestimmt hat, sowie das Zutreffen bzw. nicht Zutreffen dieser Erwartung dargestellt. In Klammern dargestellte Ergebnisse sind nicht signifikant nach dem 95,4% Kriterium.

**Tabelle 2: Vergleich der Erwartung der MP mit den gemessenen Werten. In Klammern gesetzte Angaben bedeuten, dass sie zwar für die berechneten Mittelwerte zutreffen, aber eine Fehlerwahrscheinlichkeit > 4,6% aufweisen. (Datenquellen und Algorithmus: siehe Text)**

Messpunkt	Gebietart	Erwartung $T_{a \max}$	Erwartung $T_{a \min}$	$T_{a \max}$	$T_{a \min}$	Erwartung trifft zu ( $T_{a \max}$ )	Erwartung trifft zu ( $T_{a \min}$ )
1	Dach	wärmer	etwa gleich	wärmer	(wärmer)	Ja	Ja
2	dicht bebaut	wärmer	wärmer	wärmer	wärmer	Ja	Ja
3	Wärmeinsel (MODIS)	wärmer	wärmer	kühler	wärmer	Nein	Ja
4	Parknähe, Straßenmitte	kühler	kühler	kühler	(wärmer)	Ja	Nein
5	Park	kühler	kühler	kühler	(wärmer)	Ja	Nein
6	Park	kühler	kühler	(wärmer)	(kühler)	(Nein)	(Ja)
7	kühl (MODIS)	kühler	kühler	(wärmer)	wärmer	(Nein)	Nein
8	dicht bebaut	wärmer	wärmer	(kühler)	wärmer	(Nein)	Ja
9	dicht bebaut	wärmer	wärmer	kühler	wärmer	Nein	Ja
10	Wärmeinsel (MODIS)	wärmer	wärmer	(wärmer)	(wärmer)	(Ja)	(Ja)

## 4.2 Korrelation MODIS-Begumpet

Um eine Korrelation zwischen der MODIS-Oberflächentemperatur und der Lufttemperatur herzustellen, wurden verschiedene Regressionsmodelle erstellt. Hierzu wurden die Daten des MODIS-Satelliten für den Zeitraum 2000 (Beginn der Aufzeichnung von MODIS) bis 2007 herangezogen. Diese wurden mit den Daten der Wetterstation Begumpet in Verbindung

gebracht. Da die lückenlose Zeitreihe für Begumpet 2007 endet, wurde MODIS auch nur bis zu diesem Zeitpunkt betrachtet.

Zunächst wurde ein monovariates Regressionsmodell erstellt. Hier wurde der MODIS-Tag Wert als unabhängige Variable gewählt um auf  $T_{a \max}$  zuschließen. Um eine Korrelation zwischen MODIS- $T_O$  und  $T_{a \min}$  herzustellen, wurde der MODIS-Nacht Wert als unabhängige Variable gewählt um daraus auf  $T_{a \min}$  zu schließen. Zusätzlich wurde der MODIS-Mittelwert-Tag bzw. MODIS-Mittelwert-Nacht als unabhängige Variable gewählt. Der MODIS-Mittelwert setzt sich aus den neun Pixelwerten zusammen, in deren Mitte Begumpet liegt. Für das monovariante Regressionsmodell ergab die Verwendung des MODIS-Mittelwertes eine geringfügige Verbesserung von  $T_{a \max}$ . Für  $T_{a \min}$  konnte diese durch die Verwendung des MODIS-Mittelwertes deutlich verbessert werden. Als Maß für die Qualität des Fits wurde der  $R^2$ -Wert herangezogen, der angibt, welcher Anteil der Variabilität der abhängigen Größe mit dem Regressionsmodell beschrieben werden kann.

Stationsdaten Begumpet:

(1)  $T_{a \max}$ ; (2)  $T_{a \min}$

(5) MODIS-Tag; (6) MODIS-Nacht

(7) MODIS-Mittelwert-Tag; (8) MODIS-Mittelwert-Nacht

**Tabelle 3: monovariates Modell:  $Y = a_0 + a_1 \cdot X$**   
(Datenquellen und Algorithmus: siehe Text)

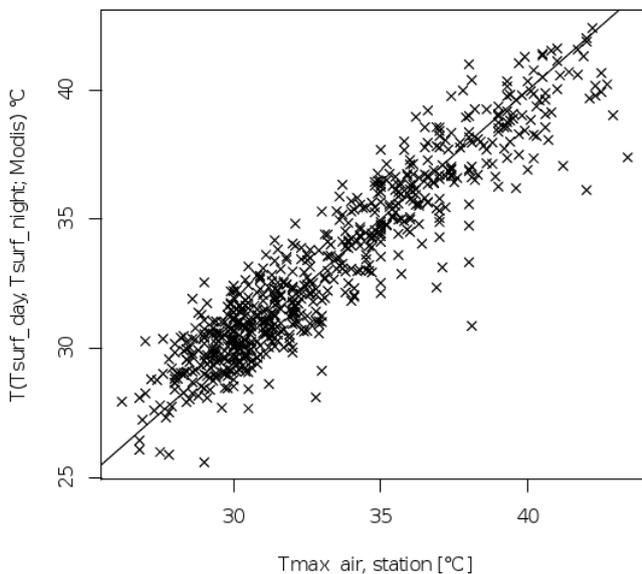
unabh.	abh.	$R^2$	$a_1$	$a_0$
5	1	,80	0,73	7,78
7	1	,81	0,72	8,02
6	2	,67	0,83	3,93
8	2	,73	0,71	9,65

Zur Verbesserung des Regressionsmodells wurde ein multivariates Modell erstellt. Für dieses Modell wurden der MODIS-Tagwert und der MODIS-Nachtwert kombiniert. Diese Kombination wurde zur Vorhersage von  $T_{a \max}$  und  $T_{a \min}$  verwendet. Das multivariate Modell stellt eine Verbesserung gegenüber dem monovariaten Modell dar. Eine Verwendung der MODIS-Mittelwerte brachte weder für die Korrelation zu  $T_{a \max}$  noch zu  $T_{a \min}$  eine Verbesserung.

**Tabelle 4: multivariates Modell:  $Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2$**   
 (Datenquellen und Algorithmus: siehe Text)

unab1	unab2	abh.	R <sup>2</sup>	a0	a1	a2
5	6	1	,87	7,10	0,44	0,48
5	6	2	,78	-8,11	0,19	0,86
7	8	1	,87	7,18	0,43	0,48
7	8	2	,78	-8,40	0,19	0,88

Durch Anwendung des multivariaten Modells kann der R<sup>2</sup>-Wert von 0,81 (0,73) auf 0,87 (0,78) für T<sub>a max</sub> (T<sub>a min</sub>) erhöht werden. Die Verbesserung für T<sub>a max</sub> kann dadurch erklärt werden, dass der typische Zeitpunkt, an dem die Tagesmaximaltemperatur erreicht wird, zwischen den Zeitpunkten des MODIS Tages- und Nachtüberfluges liegt. Hier kann man eindeutig sagen, dass das multivariate Modell vorzuziehen ist. 87% der beobachteten Variabilität von T<sub>a max</sub> aus MODIS erklären zu können, ist ein recht gutes Ergebnis, das insgesamt die Verwendung von MODIS-Daten als Schätzer für die Lufttemperatur rechtfertigt. In Abb. 10 ist der auf Basis von MODIS modellierte gegen den gemessenen Wert von T<sub>a max</sub> für alle Tage, an denen die MODIS-Werte und eine Stationsmessung vorliegen, aufgetragen. Allerdings sieht man schon in dieser Abbildung, dass das Modell bei höheren Temperaturen eine größere Streuung aufweist.



**Abbildung 10: Plot des besten Regressionsmodells.**  
 (Quellen und verwendeter Algorithmus: siehe Text.)

Um dies zu quantifizieren, wurde eine Unterteilung des Datensatzes in Tage mit  $T_{a \max} > 35 \text{ °C}$  und in Tage  $< 35 \text{ °C}$  vorgenommen und die multivariate Regression für beide Teildatensätze durchgeführt. Es zeigt sich, dass  $R^2$  für die heißen Tage nur 0,544 beträgt, also deutlich schlechter ist. Für die Tage mit  $T_{a \max} < 35 \text{ °C}$  liegt der Wert bei 0,69 (wegen Verkleinerung des Datensatzes schlechter als 0,87). Dies weist darauf hin, dass  $T_O$  während Hitzewellen möglicherweise ein schlechterer Indikator für lokale Wärmeinseln ist. Dies ist nachteilig, weil gerade für solche Phasen die räumliche Verteilung der Temperatur im Stadtgebiet besonders interessant ist.

### 4.3 Modiszeitreihen-Messzeitreihen

Nun soll untersucht werden, wie sich der Zusammenhang zwischen MODIS und Lufttemperatur-Bodenmessungen während des Feldaufenthalts darstellt. Wie in Abschnitt „Wetterdaten der Station Begumpet“ gezeigt, war dieser Zeitraum im Vergleich zum langjährigen Mittel überdurchschnittlich heiß. Aus den Betrachtungen des vorherigen Abschnitts kann man also schließen, dass der Zusammenhang wahrscheinlich nicht sehr eng sein wird.

Als erstes wurde direkt das beste Regressionsmodell (siehe Tab. 4) für die langjährige Datenreihe auf die MODIS-Daten der  $T_O$  für die jeweiligen Messpunkte angewendet. Unter der Annahme der Allgemeingültigkeit dieses an der langjährigen Messreihe geeichten Modells würde man die beste Reproduktion von  $T_a$  an den Messpunkten erwarten. Durch die Kombination von MODIS-Tag und MODIS-Nacht in diesem Modell verringert sich die Zahl der verwendbaren Daten allerdings deutlich. In Abbildung 11 werden die Resultate beispielhaft für MP8 gezeigt. Die aus MODIS-Tag und MODIS-Nacht errechneten Werte von  $T_a$  weisen eine breite Streuung auf, während die  $T_a$  Werte der Messungen nur in einem kleineren Bereich schwanken. Weder für die gemessenen Minimal- noch Maximaltemperaturen lässt sich eine Korrelation zwischen MODIS-basierten und gemessenen Werten erkennen (die Punkte müssten eigentlich entlang der Hauptdiagonalen liegen). Man kann auf diese Weise also die Lufttemperatur nicht aus den MODIS-Daten vorhersagen. In Appendix 3 sind die entsprechenden Abbildungen für die anderen Messpunkte dokumentiert. Für die Messpunkte 2, 3 und 5 liegen keine Daten vor bei denen das beste Modell in Bezug zu einer Lufttemperaturmessung gesetzt werden könnte. Für die weiteren Messpunkte zeigt sich überall eine ähnliche Situation.

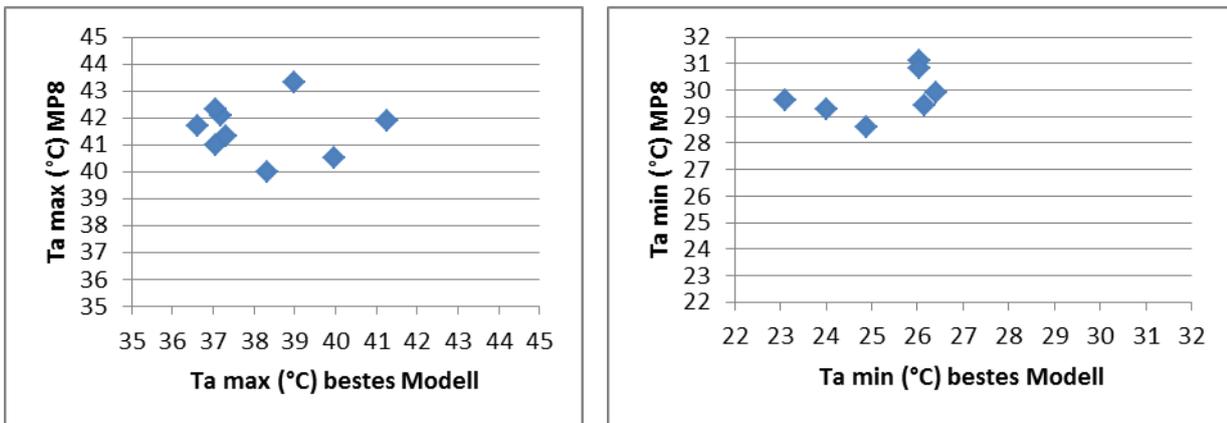


Abbildung 11: Vergleich von Ta aus MODIS abgeleitet und Ta am MP 8.  
(Quellen und verwendete Algorithmen: siehe Text)

Ein qualitativer Vergleich von Trends zwischen der aus MODIS errechneten  $T_a$  und der direkt gemessenen  $T_a$  ist schwer möglich, da die MODIS-Zeitreihe wegen Bewölkung sehr lückenhaft ist. In Abbildung 12 wird dies für den MP8 deutlich – an den anderen MPs ist die Situation ähnlich.

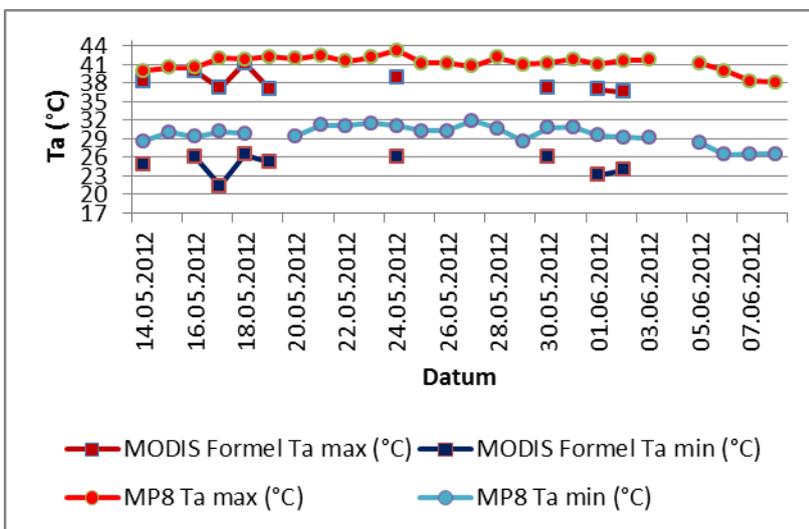


Abbildung 12: Vergleich der Zeitreihe Ta aus MODIS abgeleitet und Ta am MP 8.  
(Quellen und Algorithmus: siehe Text)

Da sich herausgestellt hat, dass das an der langen Zeitreihe von Begumpet geeichte Modell nicht allgemeingültig ist, wird im Folgenden für jeden MP mit einer Korrelationstabelle geprüft, ob zumindest ein MP-spezifischer Zusammenhang besteht. Tabelle 5 zeigt die Korrelationskoeffizienten für die Messpunkte 7 und 8 sowie die Begumpetstation (während des Feldaufenthalts). Für die anderen Messpunkte gab es zu wenig Tage, an denen alle Werte verfügbar waren.

**Tabelle 5: Korrelationstabellen**  
(Datenquellen und Algorithmus: siehe Text)

MP7	$T_{a \text{ min}}$	$T_{a \text{ max}}$
MODIS-Nacht	0,44	0,34
MODIS-Tag	0,11	0,71

MP8	$T_{a \text{ min}}$	$T_{a \text{ max}}$
MODIS-Nacht	0,30	-0,01
MODIS-Tag	-0,02	-0,04

Begumpet	$T_{a \text{ min}}$	$T_{a \text{ max}}$
MODIS-Nacht	0,07	0,05
MODIS-Tag	-0,59	0,51

Man würde erwarten, hohe positive Korrelationen zwischen MODIS-Nacht und  $T_{a \text{ min}}$  (1), sowie zwischen MODIS-Tag und  $T_{a \text{ max}}$  (2) zu finden. Betrachtet man zunächst die Begumpetstation, sieht man (2) mit 0,51 einigermaßen, (1) dagegen mit 0,07 überhaupt nicht erfüllt. Qualitativ etwas besser erfüllt MP7 den erwarteten Zusammenhang, quantitativ entspräche dies für (1) aber nur einem  $R^2$  von nur 0,5 und für (2) von nur 0,2. An MP8 existiert der Zusammenhang (1) überhaupt nicht, es zeigt sich nur eine schwache Korrelation für (2), die allerdings in Begumpet ganz fehlt. Angesichts der geringen und der teils mechanistisch nicht erklärbaren Werte für die Korrelationskoeffizienten kann man schlussfolgern, dass auch bei separater Betrachtung der einzelnen Messpunkte kein zufriedenstellender Zusammenhang zwischen MODIS und den einzelnen Temperaturmessungen besteht.

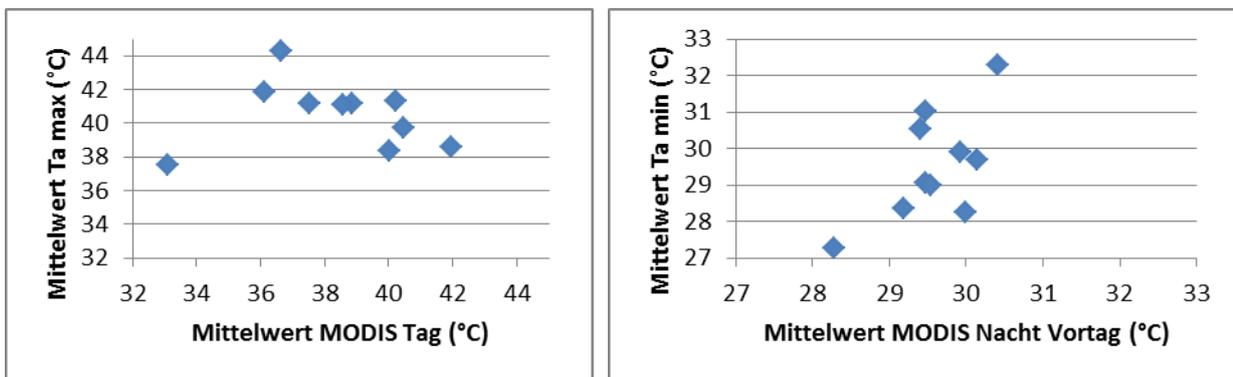
Dies steht nicht im Widerspruch zu dem recht engen Zusammenhang, der im Abschnitt „Korrelation MODIS-Begumpet“ gezeigt wurde, da die Messperiode überdurchschnittlich heiß war und für diese Situation auch in der langjährigen Messreihe die Korrelation deutlich abnahm.

Schließlich kann man noch feststellen, dass sich für den Messzeitraum die Begumpet Korrelationskoeffizienten nicht erwartungsgemäßer verhalten als die an den Messpunkten, sodass mögliche Unzulänglichkeiten der Messung nicht der Grund für die schwachen Zusammenhänge sein können.

Nach diesen Ergebnissen stellt sich nun die Frage, ob unter den Bedingungen von Hitzewellen überhaupt sinnvolle Schlüsse aus den MODIS Oberflächentemperaturen für die Lufttemperaturen gezogen werden können.

Eine wichtige Information wäre es, wenn es gelänge, aus den MODIS-Daten unter Hitzewellenbedingungen durchschnittlich wärmere Gebiete zu identifizieren. Bisher wurde ja untersucht, ob man MODIS verwenden kann, um entlang der Zeitdimension an einem Ort den Gang der Lufttemperatur vorherzusagen.

Nun sollen also die Mittelwerte der aus MODIS errechneten Oberflächentemperatur mit den Mittelwerten der Messergebnisse von  $T_a$  an den jeweiligen MPs miteinander verglichen werden.



**Abbildung 13: Mittelwert der MODIS-basierten  $T_o$  Werte im Vergleich mit den Mittelwerten der  $T_a$  Messungen. Jeder Punkt stellt einen Messpunkt dar. (Quellen und Algorithmen: siehe Text)**

Berechnet man nun wieder die Korrelationskoeffizienten zwischen den in Abbildung 13 dargestellten Werten erhält man für die Tagesmaximaltemperaturen wieder einen sehr kleinen Wert von nur -0,096. Das heißt, dass MODIS-basierte Karten für diese Temperaturvariable keine verwertbaren Aussagen liefern. Für den Zusammenhang zwischen MODIS-Nacht und der Tagesminimaltemperatur jedoch zeigt sich ein anderes Bild. Wie schon in der Abbildung zu erkennen, ist hier die Korrelation besser und hat einen, wie erwartet positiven Wert von 0,641.

Damit kann als Schlussfolgerung für diesen Abschnitt gesagt werden, dass für die urbane Agglomeration Hyderabad/Indien unter Hitzewellenbedingungen die MODIS-Daten am ehesten zur Abschätzung der räumlichen Verteilung der durchschnittlichen (über 1-2 Wochen gemittelten) Tagesminimaltemperatur verwendet werden können. Das Regressionsmodell, das den zeitlichen Mittelwert der MODIS-Nachtdaten auf den entsprechenden Mittelwert der Tagesminimaltemperaturen abbildet, lautet:

$$\langle T_{a\text{ Nacht}} \rangle = 1,58 * \langle \text{MODIS-Nacht} \rangle - 17,52^{\circ}\text{C}$$

Dieser Zusammenhang ist mit einem p-Wert von 0,046 gemessen am 5%-Level signifikant (= die positive Korrelation ist mit weniger als 5%iger Wahrscheinlichkeit zufällig) und erklärt die räumliche Varianz der mittleren Tagesminimaltemperaturen zu 41% ( $R^2=0,414$ ).

#### **4.4 Validierung des Slumidentifizierungs-Algorithmus**

In den folgenden Unterkapiteln ist die Überprüfung des Slumidentifizierungs-Algorithmus beschrieben. Dazu wurden in den Monaten Mai und Juni 2012 in Hyderabad in verschiedenen Gebieten georeferenzierte Fotos aufgenommen und Beobachtungen festgehalten. Die untersuchten Gebiete sind in Abb. 1 dargestellt.

##### **4.4.1 Punkt 1**

Die Bebauungsdichte in diesem Gebiet ist sehr hoch, sie liegt zwischen 80% und 85%. Die Gebäudehöhe innerhalb dieses Gebietes variiert zwischen einstöckigen und dreistöckigen Gebäuden. Die verwendeten Baumaterialien sind Stein und Beton. Die einstöckigen Gebäude haben meist Wellblechdächer. Bei höheren Gebäuden ist die Bedachung aus permanenteren Materialien, wie Stein. Die einstöckigen Gebäude sind dem Typ pucca und die dreistöckigen Gebäude dem Typ basic built-up zuzuordnen. Die Lücken zwischen den Gebäuden sind klein. Es ist ein regelmäßiges Straßennetz zu erkennen, die Straßenbreite beträgt 3 Meter oder weniger. In diesem Gebiet sind keine Grünflächen vorzufinden. Ob ein Zugang zu Trinkwasser oder Sanitäreinrichtungen vorhanden ist, konnte nicht überprüft werden. Von der Zusammensetzung der Gebäude ist dieses Gebiet eine Mischung aus informal A und basic built-up. Die geringe Straßenbreite, die kleinen Gebäudelücken, sowie das Fehlen von Grünflächen sprechen dafür, dass es sich hier um eine informelle Siedlung handelt.



**Abbildung 14: Umgebung von Punkt 1**  
(Quelle: eigenes Foto)

#### **4.4.2 Punkt 2**

In diesem Gebiet ist eine sehr dichte Bebauung vorzufinden. Die Bebauungsdichte liegt schätzungsweise zwischen 75% und 80%. Die vorzufindenden Gebäude sind meist einstöckig. Die Gebäude sind fast ausschließlich aus Stein gemauert. Wellblechdächer sind bei etwa einem Drittel der Gebäude vorzufinden. Die Bebauung ist dem Gebäudetyp pucca zuzuordnen. In dieser Gegend ist auffällig, dass die Lücken zwischen den Gebäuden sehr klein sind. Abgesehen von einer Hauptstraße ist das Straßennetz unregelmäßig angeordnet. Die Straßenbreite beträgt auf der Hauptstraße etwa 6 Meter. Die meisten Nebenstraßen weisen eine Breite von etwa 3 Metern auf. Grünflächen sind nur in sehr geringem Maße vorzufinden. Der Zugang zu Trinkwasser bzw. Sanitäreinrichtungen konnte nicht überprüft werden. Die genannten Kriterien der kleinen Gebäudelücken, der verwendeten Dachmaterialien, sowie das geringe Vorhandensein von Grünflächen sprechen für eine informelle Siedlung.

#### **4.4.3 Punkt 3**

Die Bebauungsdichte liegt in dieser Gegend bei etwa 75 – 80%. Es sind überwiegend zweistöckige Gebäude, aber auch ein- und dreistöckige Gebäude vorzufinden. Die Behausungen sind aus Stein oder Beton erbaut. Der Anteil von Wellblechdächern ist gering. Die mehrstöckigen Gebäude entsprechen dem Typ basic built-up. Die in geringem Maße vorkommenden einstöckigen Gebäude sind dem Typ pucca zuzuordnen. Die Lücken zwischen den Gebäuden sind klein. Das Straßennetz ist regelmäßig angeordnet. Die Straßenbreite ist gering, allerdings weisen die Hauptstraßen in diesem Gebiet eine höhere Breite von etwa 6 – 7 m auf. Es ist ein geringer Anteil von Vegetation vorhanden. Die teils größere Straßenbreite,

sowie das in geringerem Maße Vorhandensein von Vegetation und vor allem die in großem Anteil vorkommenden basic built-up Gebäuden lassen den Schluss zu, dass dieses Gebiet nicht als Slum zu bezeichnen ist.



**Abbildung 15: Umgebung des Punktes 3**  
(Quelle: eigene Fotos)

#### **4.4.4 Punkt 4**

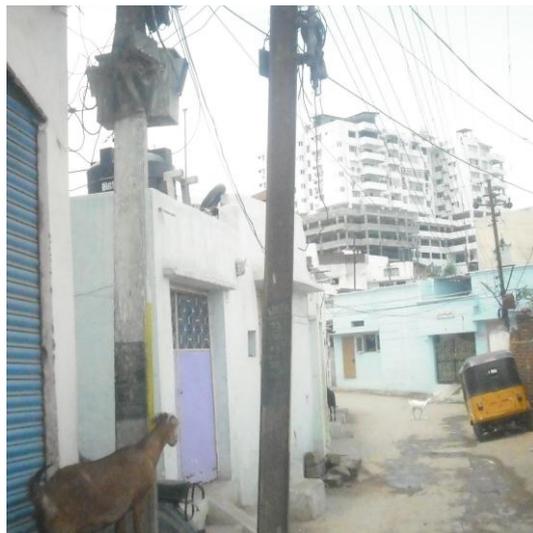
Die Bebauungsdichte ist sehr hoch, etwa 85%-90%. In der Umgebung dieses Punktes sind überwiegend einstöckige Gebäude vorzufinden. Das Baumaterial dieser Gebäude ist fast ausschließlich Stein. Die Dächer bestehen zu mehr als einem Drittel aus Wellblech. Die Gebäude entsprechen somit dem Typ pucca. Zwischen den Gebäuden sind kaum Lücken oder nur sehr kleine Lücken anzutreffen. Das Straßennetz ist sehr regelmäßig angeordnet. Sowohl die Zugangsstraßen zu diesem Gebiet als auch die Straßen innerhalb des Gebietes sind nicht asphaltiert. Die Breite der Straße ist sehr gering, unter 3 Metern. Grünflächen sind nicht vorzufinden. Die genannten Kriterien lassen den Schluss zu, dass es sich um eine informelle Siedlung handelt.



**Abbildung 16: Umgebung von Punkt 4**  
(Quelle: eigenes Foto)

#### **4.4.5 Punkt 5**

Die Bebauungsdichte in diesem Gebiet ist sehr hoch, etwa 80%-85%. Es sind Großteils einstöckige Gebäude vorzufinden. Die Gebäude sind aus Beton oder Stein gebaut. Der Anteil an Wellblechdächern liegt bei etwa 40%. Die Gebäude entsprechen dem Typ pucca. Die Lücken zwischen den Gebäuden sind klein, oftmals ist auch eine lückenlose Bebauung anzutreffen. In dieser Gegend sind sehr enge Gassen vorzufinden. Selbst die Hauptzugangsstraßen sind nur wenige Meter breit. Das Straßennetz ist unregelmäßig angeordnet. Grünflächen sind keine vorhanden. Hier sind somit die Kriterien für eine informelle Siedlung erfüllt.



**Abbildung 17: Umgebung von Punkt 5**  
(Quelle: eigenes Foto)

#### 4.4.6 Punkt 6

Auf der Verbindungsstraße zu diesem Gebiet sind kutchas (Behausungen aus nicht permanenten Materialien wie Pappe oder Holz) anzutreffen. In der Umgebung dieses Punktes ist eine uneinheitliche Bebauung vorzufinden. Die Bebauungsdichte ist hoch, ca. 75-80%. Es sind sowohl einstöckige als auch dreistöckige Gebäude aufzufinden. Der Anteil der dreistöckigen Gebäude beträgt ca. 20%. Gebäude sind hauptsächlich aus Stein oder Beton gebaut. Die Dächer, der einstöckigen Gebäude, sind je zur Hälfte aus Stein und zur Hälfte aus Wellblech. Die dreistöckigen Gebäude entsprechen dem Typ basic built-up, die einstöckigen Gebäude sind mit dem Gebäudetyp pucca zuzuordnen. Die Bebauung ist zumeist lückenlos. Die Straßen sind sehr eng, in etwa 2-3 m breit. Das Straßennetz ist unregelmäßig angeordnet. Grünflächen sind nicht vorhanden. Insgesamt sprechen die hohe Bebauungsdichte, die geringe Straßenbreite, die kleinen Gebäudelücken, sowie das Fehlen von Grünflächen dafür, dass es sich um eine informelle Siedlung handelt.



Abbildung 18: Umgebung von Punkt 6  
(Quelle: eigenes Foto)

#### 4.4.7 Punkt 7

In der Umgebung dieses Punktes ist eine sehr hohe Bebauungsdichte von 85% - 90% vorzufinden. Die Gebäude sind aus Beton oder Stein gebaut. Es überwiegen einstöckige Gebäude, es sind aber auch drei- bis vierstöckige Gebäude vorzufinden. Die Dächer bestehen aus Stein oder Wellblech (ca. 1/3). Die meisten Gebäude entsprechen dem Typ pucca, weniger als 10% können dem Typ basic built-up zugeschrieben werden. Die Lücken zwischen den Gebäuden sind sehr klein. Die Straßen sind sehr schmal mit einer Breite kleiner als 3 m. Das Straßennetz ist unregelmäßig. Grünflächen sind keine vorhanden. Die beschriebenen Indikatoren lassen den Schluss auf eine informelle Siedlung zu.



**Abbildung 19: Umgebung von Punkt 7**  
(Quelle: eigenes Foto)

#### **4.4.8 Punkt 8**

Die Bebauungsdichte in diesem Gebiet ist sehr hoch, ca. 80%-85%. Zum Großteil sind einstöckige Gebäude vorzufinden, wobei auch dreistöckige Häuser vorhanden sind. Die Gebäude sind aus Stein oder Beton erbaut worden. Der Anteil von Wellblechdächern liegt bei ca. 1/3. Es handelt sich bei diesen um den Typ pucca. Die Lücken sind sehr klein oder es liegt eine lückenlose Bebauung vor. Das Straßennetz ist regelmäßig angeordnet, die Straßenbreite beträgt meist weniger als 3 m. Grünflächen sind hier nicht vorhanden. Die mehrstöckigen Gebäude erwecken den Anschein, dass es sich hierbei um den Typ basic built-up handelt. In einem der Gebäude konnten Fotos aufgenommen werden. Hierbei war zu erkennen, dass es sich um eine informelle Behausung handelt, da weder ein Zugang zu Trinkwasser, noch Sanitäreinrichtungen vorhanden war. Damit ist neben der hohen Bebauungsdichte, kleinen Gebäudelücken, fehlenden Grünflächen und geringer Straßenbreite ein weiteres Kriterium für eine Slumdefinition erfüllt.



**Abbildung 20: Aufnahmen in der Umgebung von Punkt 8**  
(Quelle: eigene Fotos)

#### 4.4.9 Punkt 9

Die Bebauungsdichte liegt in diesem Gebiet in etwa bei 75%. Zu etwa 60% sind einstöckige Gebäude anzutreffen, der Rest sind dreistöckige Gebäude. Die verwendeten Baumaterialien sind hauptsächlich Stein und Beton. Bei den einstöckigen Gebäuden besitzt etwa die Hälfte ein Wellblechdach. Die einstöckigen Gebäude entsprechen dem Typ pucca, wobei die dreistöckigen Gebäude dem Typ basic built-up zuzuschreiben sind. Lücken zwischen den Gebäuden sind kaum vorhanden. Auf einer Freifläche neben einer Ruine sind auch kutcha Behausungen anzutreffen. Abgesehen von der Freifläche neben der Ruine sind nur sehr kleine Grünflächen anzutreffen. Das Straßennetz ist meist regelmäßig angeordnet. Hier sind etwas größere Hauptstraßen von einer Breite mit etwa 6 m anzutreffen. Die Breite der restlichen Straßen ist gering, etwa 3 m. Dennoch lassen die dichte Bebauung, die kleinen Gebäudelücken, der geringe Anteil an Grünflächen und vor allem das Vorhandensein von kutcha Behausungen einen Schluss auf eine informelle Siedlung zu.



**Abbildung 21: Umgebung von Punkt 9**  
(Quelle: eigenes Foto)

**Tabelle 6: Kriterien der Slumerkennung und die Überprüfung vor Ort**

Punkt	Bebauungs-dichte	Gebäude-höhe	Gebäude-typ	Bau-material	Dach-material	Gebäude-lücken	Straßen-netz	Straßen-breite	Grün-fläche-n	Zugan-g zu Trink-wasser	Typ
1	80-85%	1 und 3 stöckig gemischt	Pucca, basic built-up	Stein, Beton	Wellblech bei 1 stö. Gebäuden	Klein	Regelmäßig	3 m	Keine	?	Slum
2	75%	meist 1 stöckig	Pucca, geringer Anteil basic built-up	Stein	1/2 Wellblech	Klein	Meist unregelmäßig	3-5 m	Kaum	?	Slum
3	75-80%	Hpts. 2 stöckig auch 1 und 3 stöckig	Basic built-up	Stein, Beton	Geringer Anteil Wellblech	Klein, teils lückenlos	Regelmäßig	7 m Hauptstraßen 4-5 m Nebenstraßen	Wenig	?	Basic built-up
4	85-90%	Hpts 1 stöckig	Pucca	Stein, Beton	1/3 Wellblech	Kaum	Sehr regelmäßig	3 m	Keine	?	Slum
5	80-85%	meist 1 stöckig	Pucca	Stein, Beton	40% Wellblech	Sehr klein, teils lückenlos	Sehr unregelmäßig	3 m	Keine	?	Slum
6	75-80%	Meist 1 stöckig 20% 3stöckig	Pucca, basic built-up	Stein, Beton	50% Wellblech	Meist lückenlos	Unregelmäßig	3 m	Keine	?	Slum
7	85-90%	Hpts. 1 stöckig	Pucca, < 10% basic built-up	Stein, Beton	1/3 Wellblech	Sehr klein	Regelmäßig	<3 m	Keine	?	Slum
8	80-85 %	1 stöckig, geringer Anteil 3 stöckig	Pucca	Stein, Beton	1/3 Wellblech	Sehr klein	Regelmäßig	<3 m	Keine	Nein	Slum
9	75%	60% 1 stöckig 40% 3 stöckig	40-50% Pucca, 50% basic built-up	Stein, Beton	25% Wellblech	Kaum	Regelmäßig	3 m	Kaum	?	Slum

## 5 Diskussion

### 5.1 Temperaturverteilung: die Bodenmesskampagne

Zunächst sei hier diskutiert, ob die Messungen der Lufttemperatur brauchbare Ergebnisse liefern. Dies wurde durch den qualitativen Vergleich von Trends und Trendwechseln mit der nach Idealbedingungen durchgeführten Messung der Station Begumpet plausibilisiert. Die gemessenen Werte der Lufttemperatur lassen Aussagen darüber zu, welche Gebiete sich besonders stark bzw. weniger stark aufheizen. Die gemessenen Unterschiede decken sich Großteils mit den Erwartungen, wie beispielweise wärmere  $T_a$  Werte für dicht bebaute Gebiete. Schon hier zeigt sich aber, dass dies besonders nachts zutreffend ist. Auch eine weniger starke Aufheizung von Flächen, die von Vegetation oder von Wasserflächen beeinflusst sind, konnte festgestellt werden. Hieraus lassen sich Hypothesen zur Lufttemperatur während Hitzewellen für Gebiete mit ähnlichen Bedingungen ableiten. Die Ergebnisse weisen aber auch auf kleinräumige Unterschiede der Lufttemperatur hin. Hier ist zu beachten, dass viele komplexe Faktoren diese Größe beeinflussen. Erwähnt sei hier exemplarisch MP 9, der sich in einem dicht bebauten Gebiet befand. Hier war tagsüber keine starke Aufheizung festzustellen - dies ist möglicherweise durch den Einfluss der großflächigen Beschattung durch Bäume und durch Transpirationskühlung zu erklären. Nachts dagegen traten, wie für Gebiete mit einer hohen Bebauungsdichte erwartet, hohe Werte für  $T_{a \text{ min}}$  auf. Die Lufttemperatur kann in der Stadt weit weniger als eine räumlich homogene Größe angesehen werden als in der freien Landschaft. Dies legt nahe, bei  $T_a$ -Messungen eine sehr große Anzahl von Messpunkten über die Stadt zu verteilen. Dadurch ließe sich eine weiter verbesserte Aussage über die räumliche Verteilung der Lufttemperatur in der Stadt treffen. Auch eine noch kleinräumigere Untersuchung der Lufttemperatur könnte interessante Ergebnisse liefern. Trotz der günstigen Anschaffungskosten für die Thermometer waren, wie bereits erwähnt, die Messergebnisse brauchbar. Als Argument für eine Anschaffung von günstigen Thermometern ist ein geringes Budget zu nennen. Auch kann dies ein Ansatz sein, Messkampagnen in Entwicklungsländern durchzuführen, da hier das Budget meist besonders stark begrenzt ist. Zusätzlich sei die Gefahr von Diebstählen erwähnt. Während der durchgeführten Messkampagne mit der Dauer von etwa einem Monat wurden bereits vier von 15 Thermometern gestohlen, dieser Aspekt sollte bei der Durchführung von ähnlichen Messkampagnen beachtet werden.

## 5.2 Temperaturverteilung: die Fernerkundung

Eine Korrelation zwischen der aus MODIS-Werten errechneten Oberflächentemperatur und der Lufttemperatur konnte durch die Betrachtung einer längeren Zeitreihe (Anfang 2000 – Ende 2007) belegt werden. Allerdings war für diese im Vergleich zur Dauer des Feldaufenthaltes deutlich größere Datenmenge zu erkennen, dass bei sehr hohen Lufttemperaturen die Korrelation deutlich abnimmt. Da der Fokus dieser Untersuchung auf der räumlichen Verteilung von Lufttemperatur bzw. urbanen Wärmeinseln unter Hitzewellenbedingungen lag, wurde ein besonders heißer Zeitraum ausgewählt. Das vorher kalibrierte Modell konnte an den einzelnen Messpunkten für den Beobachtungszeitraum keine Vorhersage der Lufttemperatur aus MODIS-Daten machen. Auch ein qualitativer Vergleich konnte aufgrund einer lückenhaften Verfügbarkeit von MODIS-Daten nicht durchgeführt werden. Selbst die Errechnung einer Korrelation zwischen den Werten von  $T_a$  an den einzelnen Messpunkten und den jeweiligen MODIS-Daten lieferte kein einheitliches und zufriedenstellendes Resultat. Allerdings brachte der Vergleich von Mittelwerten von  $T_{a \min}$  und aus MODIS-Daten abgeleiteten Mittelwerten eine Korrelation zutage. Für die Kombination von  $T_{a \max}$  Mittelwerten war diese wieder sehr gering, während für die zeitlichen Mittelwerte von  $T_{a \min}$  an verschiedenen Messpunkten ein signifikanter ( $p < 5\%$ ) Zusammenhang gefunden wurde, der immerhin 41% der räumlichen Variabilität dieser Größe erklären kann. Nach der vorliegenden Untersuchung kann man aus MODIS-Daten unter Hitzewellenbedingungen nur sinnvolle Schlussfolgerungen zur räumlichen Verteilung der durchschnittlichen Tagesminimallufttemperaturen ziehen. Die im vorherigen Abschnitt dokumentierte Formel ist für Hyderabad die beste Näherungsgleichung.

Die schlechtere Repräsentation der Tagesmaximallufttemperaturen im Vergleich zu den Nachtlufttemperaturen lässt sich in Einklang mit den Regressionsmodellen zur langen Begumpet-Zeitreihe bringen. Hier gelang es für eine größere Datenmenge eine gute Korrelation herzustellen, diese war aber für hohe Werte ( $T_a > 35 \text{ °C}$ ) deutlich schlechter. Dies passt dazu, dass ein Zusammenhang zwischen den Mittelwerten von  $T_{a \min}$  und den MODIS-Nachtwerten herzustellen war, allerdings nicht für die Kombination von  $T_{a \max}$  und MODIS-Tagwerten. Bei höheren  $T_a$  bzw.  $T_O$  Werten sind die MODIS-Daten weniger bis nicht brauchbar um einen Zusammenhang zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur herzustellen.

Dass keine weitergehenden Schlussfolgerungen möglich sind, liegt zum Einem daran, dass es sich bei Oberflächentemperatur und Lufttemperatur um zwei verschiedene Größen handelt und deren Zusammenhang noch nicht vollständig verstanden ist (siehe Motivation). Außerdem sind die von MODIS durchgeführten Messungen Flächenmessungen. Die

Auflösung der aus MODIS-Daten errechneten Oberflächentemperatur beträgt etwa 1 km x 1 km (Tomlinson et al. 2012a). Im Gegensatz hierzu stehen die durchgeführten Punktmessungen der Lufttemperatur und es ist vor den Messungen kaum möglich festzustellen, was ein repräsentativer oder durchschnittlicher Messpunkt innerhalb der von MODIS gemittelten Fläche ist. Hier könnte ein räumlich viel feineres Messnetz helfen, was, wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, mit relativ geringen Mitteln zu realisieren wäre. Man hätte dann innerhalb eines MODIS-Pixels etliche Messpunkte und könnte darauf aufbauend vielleicht weitere Zusammenhänge zwischen MODIS und der Verteilung von Ta entdecken. Dies wäre sehr nützlich, denn der Vorteil der MODIS-Daten ist, dass sie frei verfügbar und sehr schnell nach der Erhebung abrufbar sind. Auch können hier Daten zu großen Flächen aufgenommen werden, was durch Punktmessungen aus Zeit und Kostengründen oft nicht möglich ist.

### **5.3 Slumidentifizierung**

Der verwendete Algorithmus liegt bei acht von neun Punkten richtig - dies kann als eine sehr gute Klassifikation angesehen werden. Daraus lässt sich schließen, dass eine schnelle und effiziente Erkennung von Slums mithilfe des Algorithmus möglich ist. Die Fehlklassifikation des Punktes 3 kann möglicherweise dadurch erklärt werden, dass es sich hierbei um ein Gebiet in der Altstadt Hyderabads handelt. Hier liegt die Vermutung nahe, dass noch eine alte Gebäudestruktur vorliegt, aber bereits eine Aufwertung der Infrastruktur stattgefunden hat. Dieses Beispiel zeigt auch, dass, wie bereits von Baud et al. (2010) erwähnt, die Verwendung von lokalem Wissen ein wichtiger Bestandteil der Klassifikation von Siedlungsstrukturen sein kann. Ein großer Vorteil dieses Algorithmus ist, dass keine Kosten für Software Lizenzen entstehen und auch die Hardware Anforderungen gering sind (Kit et al. 2012). Dadurch ist dieser auch mit geringen finanziellen Mittel sehr gut anwendbar, was besonders für die Verwendung in Entwicklungs- und Schwellenländern sehr wichtig ist, da hier die Ressourcen meist besonders begrenzt sind. Ein weiterer Vorteil beruht in dem hohen Automatisierungsgrad des Algorithmus. So können Zeit und Kosten eingespart werden. Im Gegensatz hierzu ist die von Baud et al. (2010) verwendete visuelle Interpretation sehr arbeitsintensiv. Die genannten Vorzüge zeigen, dass der Algorithmus ein geeignetes Werkzeug sein kann, die räumliche, sowie zeitliche Veränderung von informellen Siedlungen zu erfassen. Somit können die oftmals lückenhaften Daten objektiv überprüfbar gemacht werden. Eine effiziente Identifizierung von Slums kann es ermöglichen, geeignete Infrastrukturmaßnahmen zu treffen, welche den besonders vulnerablen Bewohnern von informellen Siedlungen zu Gute kommen könnten.

## **Danksagung**

Als erstes möchte ich meinem Betreuer am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Dr. Matthias K. B. Lüdeke, für viele wertvolle Diskussionen und Anregungen, sowie die Unterstützung im Verlauf der Erstellung dieser Arbeit, danken. Ebenso möchte ich Dr. Steffen Vogt für die Anregungen zur Strukturierung und die Kommentierung unterschiedlicher Zwischenstadien der Arbeit danken.

Mein weiterer Dank gilt Oleksandr Kit für die Möglichkeit mit dem von ihm programmierten Slumerkennungsalgorithmus zu arbeiten, sowie für wertvolle Diskussionen zu diesem Teil meiner Untersuchung.

Besonderer Dank gebührt ebenfalls Lydia Polakowski, die mich bei der Einarbeitung in die Daten des MODIS-Satelliten durch Hilfe und Rat unterstützte.

Schließlich möchte ich Sebastian Schubert für wertvolle Diskussionen zur statistischen Fehlerberechnung danken.

## Literaturverzeichnis

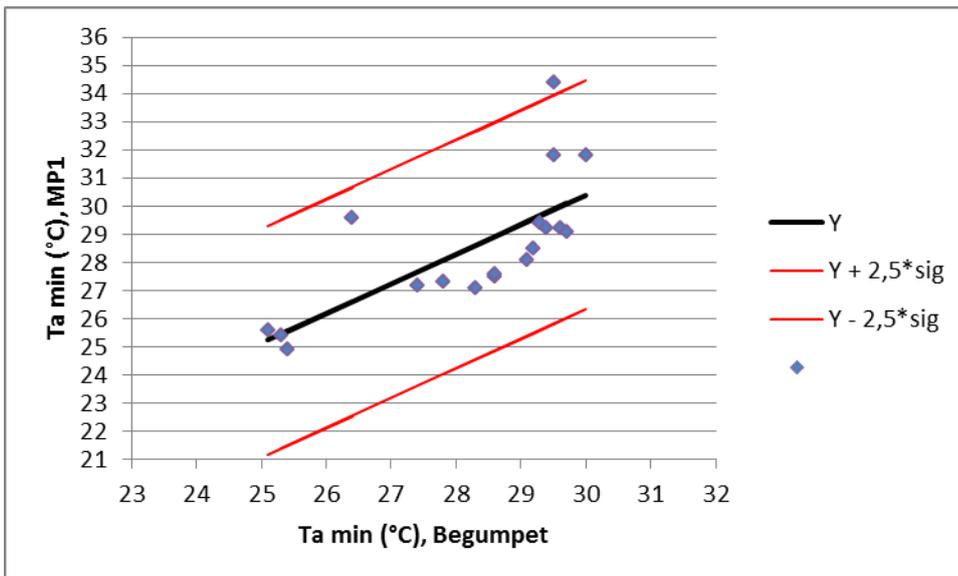
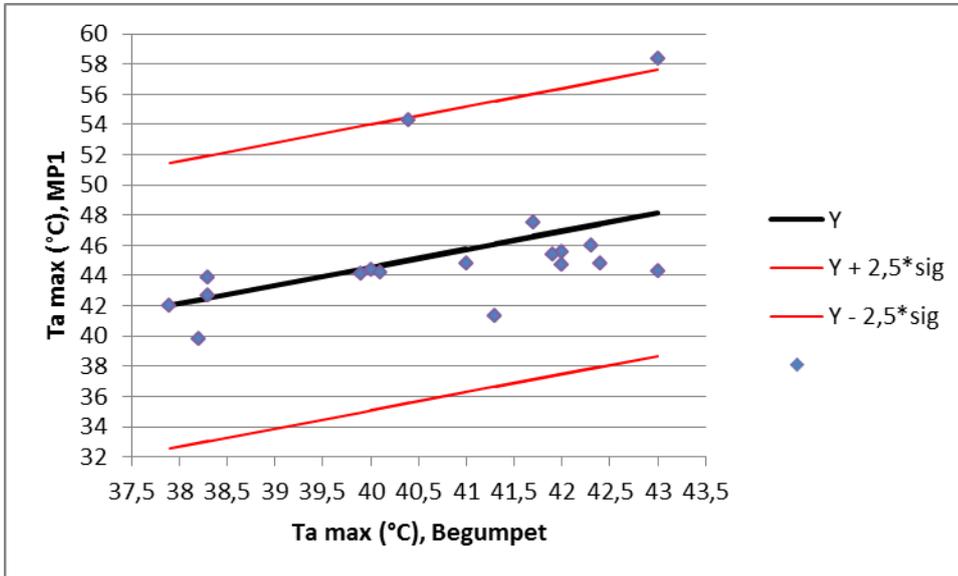
- Amorim, L., M. N. Barros Filho, & D. Cruz, 2009: Analysing Recife's Urban Fragments. *Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium*, Hrsg. D. Koch, L. Marcus, & J. Steen, Stockholm: KTH, 1–14.
- Baltsavias, E., & S. Mason, 1997: Image-based reconstruction of informal settlements. *17. International workshop "Automatic extraction of man-made objects from aerial and space objects,"* Hrsg. A. Gruen, E.P. Baltsavias, & O. Henricsson, Ascona, Birkhäuser Verlag, Basel, 87–96.
- Barros Filho, M. N., & F. J. A. Sobreira, 2008: Accuracy of lacunarity algorithms in Texture Classification of high spatial resolution images from urban areas. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 417–422.
- Baud, I., M. Kuffer, K. Pfeffer, R. Sliuzas, & S. Karuppappan, 2010: Understanding heterogeneity in metropolitan India: The added value of remote sensing data for analyzing sub-standard residential areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **12**, 359–374, doi:10.1016/j.jag.2010.04.008.
- Bhaskaran, S., S. Paramananda, & M. Ramnarayan, 2010: Per-pixel and object-oriented classification methods for mapping urban features using Ikonos satellite data. *Applied Geography*, **30**, 650–665, doi:10.1016/j.apgeog.2010.01.009.
- Blaschke, T., 2010: Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **65**, 2–16, doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004.
- Canny, J., 1986: A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-8**, 679–698, doi:10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- Census of India, 2001: *Metadata and Brief Highlights on Slum Population*.
- Cheng, P., T. Toutin, & Y. Zhang, 2003: QuickBird – Geometric Correction , Data Fusion , and Automatic DEM Extraction. *Earth Observation Magazine*, **11**, 14–18.
- Cheval, S., A. Dumitrescu, & A. Bell, 2009: The urban heat island of Bucharest during the extreme high temperatures of July 2007. *Theoretical and Applied Climatology*, **97**, 391–401, doi:10.1007/s00704-008-0088-3.
- GHMC, 2010: *Revised master plan for core area (erstwhile MCH area) of GMCH. Report No. 3650*. Hyderabad,.
- Governance, C. for G., 2008: Survey of Child Labour in Slums of Hyderabad: Final Report. 126.
- Häckel, H., 2012: *Meteorologie*. 7 Auflage. Stuttgart.

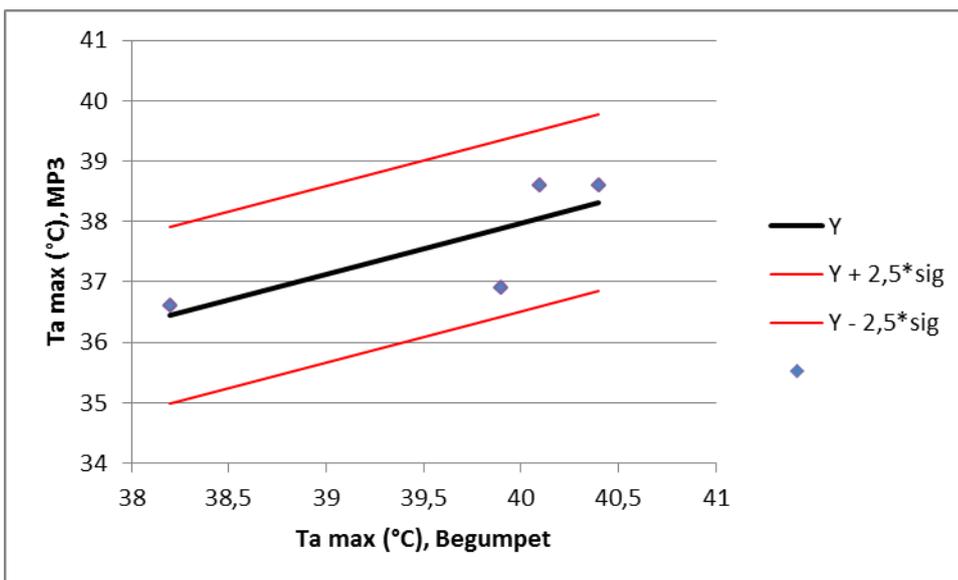
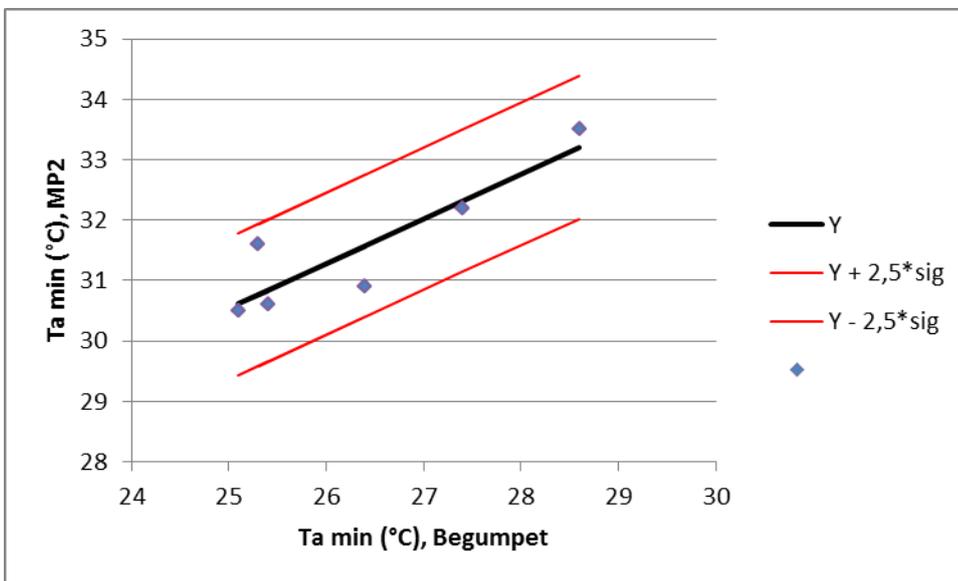
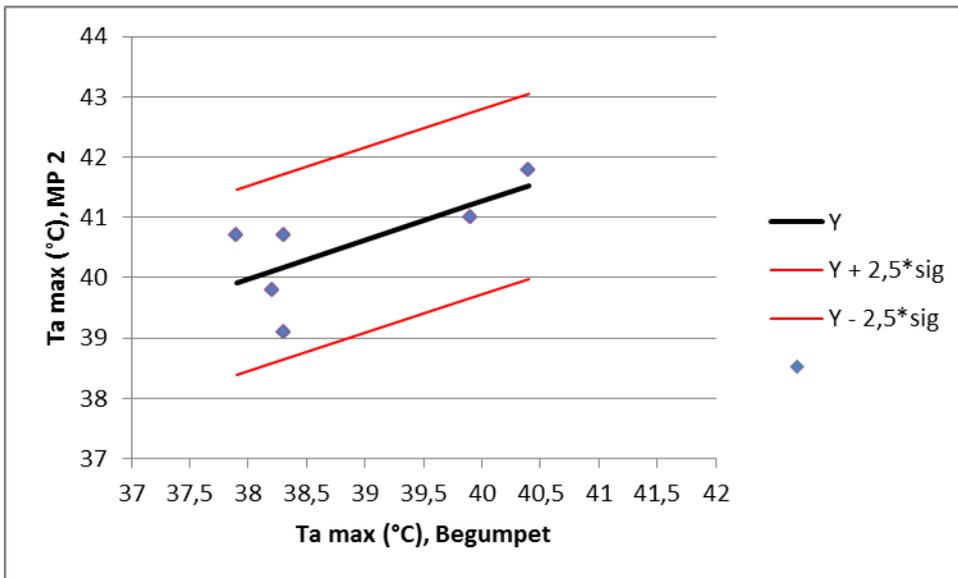
- Kant, Y., B. D. B. Javed, J. Mallick, A. Clement, & K. Norman, 2009: Satellite-based Analysis of the Role of Land Use / Land Cover and Vegetation Density on Surface Temperature Regime of Delhi , India. *Indian Society of Remote Sensing*, **37**, 201–214.
- Karl, T. R., H. F. Diaz, & G. Kukla, 1988: Urbanization: Its Detection and Effect in the United States Climate Record. *Journal fo Climate*, **1**, 1099–1123.
- Kit, O., M. Lüdeke, & D. Reckien, 2012: Texture-based identification of urban slums in Hyderabad, India using remote sensing data. *Applied Geography*, **32**, 660–667, doi:10.1016/j.apgeog.2011.07.016.
- Lohninger, H., 2012: *Grundlagen der Statistik*. eBook. Download: 29.08.2012 verfügbar unter: [http://www.statistics4u.com/fundstat\\_germ/](http://www.statistics4u.com/fundstat_germ/).
- Lüdeke, M. K. B., M. Budde, O. Kit, & D. Reckien, 2012: *Climate Change scenarios for Hyderabad: integrating uncertainties and consolidation*. Hyderabad.
- MCH, 2005: *Draft city development plan. Hyderabad: Municipal Corporation of Hyderabad*. Hyderabad.
- Malhi, Y., & R. M. Román-Cuesta, 2008: Analysis of lacunarity and scales of spatial homogeneity in IKONOS images of Amazonian tropical forest canopies. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 2074–2087, doi:10.1016/j.rse.2008.01.009.
- Mandelbrot, B. B., 1983: On the Quadratic Mapping  $z \rightarrow z^2 - 1$  for complex  $z$ : the fractal structure of its .H Set, and scaling. *Physica*, **7**, 224–239.
- Mendelsohn, R., P. Kurukulasuriya, A. Basist, F. Kogan, & C. Williams, 2007: Climate analysis with satellite versus weather station data. *Climatic Change*, **81**, 71–83, doi:10.1007/s10584-006-9139-x.
- Myint, S., & Lam, N. (2005). A study of lacunarity-based texture analysis approaches to improve urban image classification. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(5), 501-523.
- Myint, S. W., P. Gober, A. Brazel, S. Grossman-Clarke, & Q. Weng, 2011: Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, **115**, 1145–1161, doi:10.1016/j.rse.2010.12.017.
- NASA, 2012: Zugriff: 20.08.2012, verfügbar unter: <http://www.nasa.gov/>
- Oke, T. R., 1988: The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, **12**, 471–508, doi:10.1177/030913338801200401.
- Satterthwaite, D., 2010: Urban myths and the mis-use of data that underpin them. *Urbanization and Development: Multidisciplinary perspectives.*, Hrsg. J. Beall, R. Kanbur, & B. Guha-Khasnobis, 83–101, Oxford University Press.
- Taylor, J. R., 1997: *An Introduction to Error Analysis The study of uncertainties in physical measurements*. 2. Auflage. Sausalito.

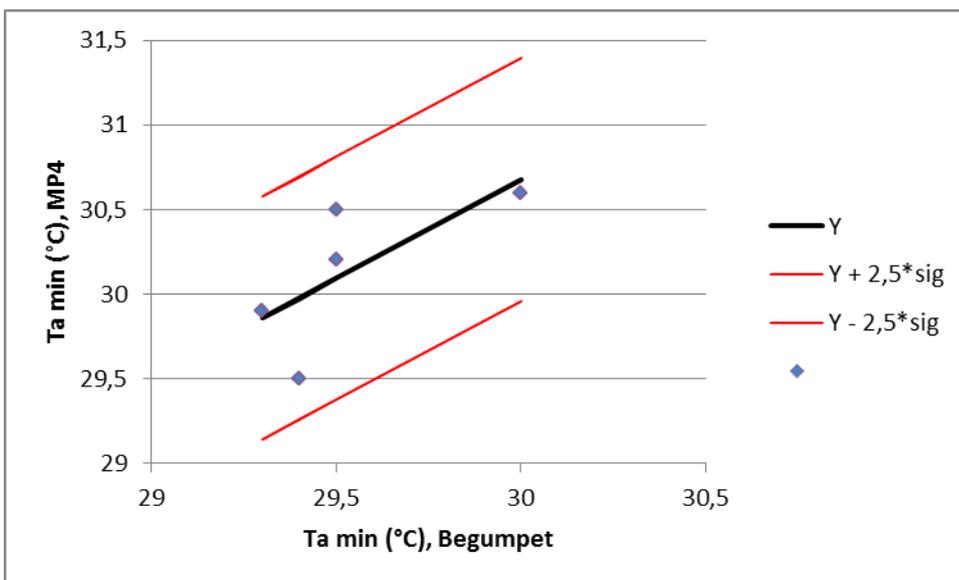
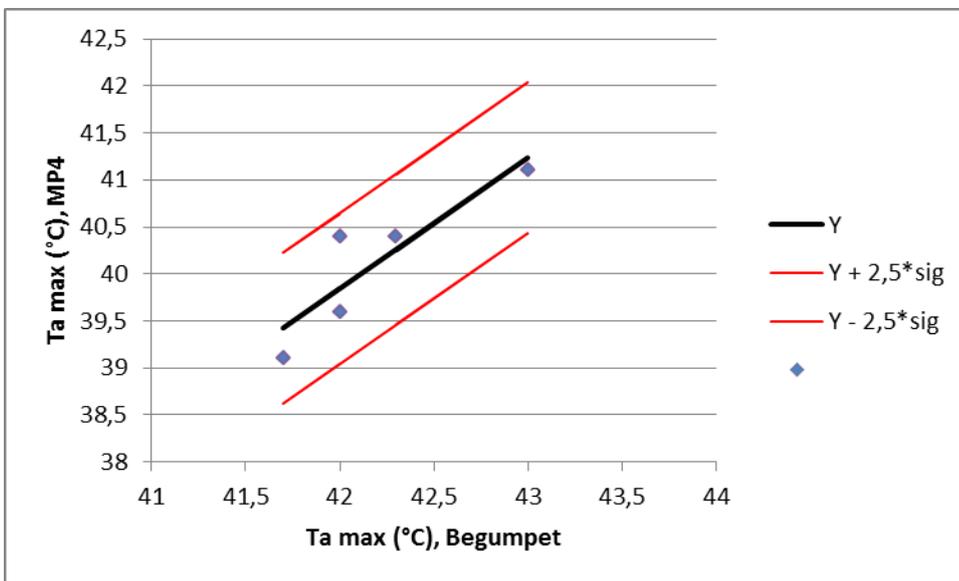
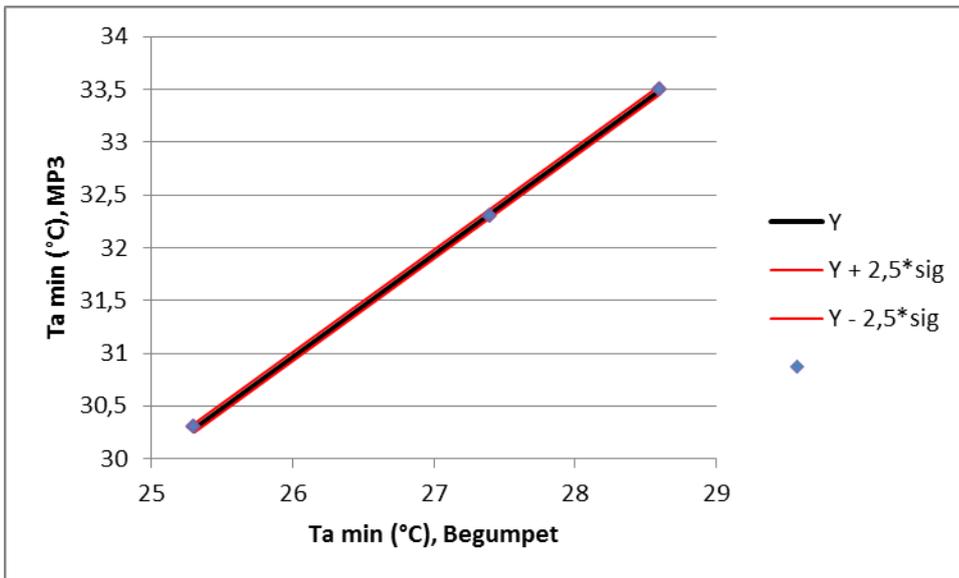
- Tomlinson, C. J., L. Chapman, J. E. Thornes, & C. J. Baker, 2012a: Derivation of Birmingham's summer surface urban heat island from MODIS satellite images. *International Journal of Climatology*, **32**, 214–224, doi:10.1002/joc.2261. <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.2261>
- Tomlinson, C. J., L. Chapman, J. E. Thornes, C. J. Baker, & T. Prieto-lopez, 2012b: Comparing night-time satellite land surface temperature from MODIS and ground measured air temperature across a conurbation. *Remote Sensing Letters*, **4**, 657–666, doi:<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.659354>.
- Torok, S. J., C. J. G. Morris, C. Skinner, & N. Plummer, 2001: Urban heat island features of southeast Australian towns. *Australian Meteorological Magazine*, **50**, 1–13.
- Tran, H., D. Uchihama, S. Ochi, & Y. Yasuoka, 2006: Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **8**, 34–48, doi:10.1016/j.jag.2005.05.003.
- UN, 2007: *State of the world's cities report 2006/7*. Nairobi,
- UN, 2011: UN Data Glossary. <http://data.un.org/Glossary.aspx> (Accessed September 13, 2012).
- USGS, 2012: Zugriff: 24.08.2012, verfügbar unter: <http://www.usgs.gov/>
- Wang, W., S. Liang, & T. Meyers, 2008: Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 623–635, doi:10.1016/j.rse.2007.05.024.
- Weng, Q., 2009: Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64**, 335–344, doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007.
- Wetteronline, de (2012): Zugriff Juni 2012, verfügbar unter: [http://wom.wetteronline.de/?pcid=pc\\_rueckblick\\_data&gid=43128](http://wom.wetteronline.de/?pcid=pc_rueckblick_data&gid=43128)
- xDat (eXtensible Database Access Tool). Potsdam Institute für Klima Folgen Forschung. Zugriff Mai 2012, verfügbar unter: <http://www.pikpotsdam.de/institute/organization/scientific-departments/datacomputation/sdm/tools/xdat/>
- Zhou, B., 2012: Urban Heat Island ( UHI ): A study based on a vast number of urban agglomerations. Master Arbeit. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau.

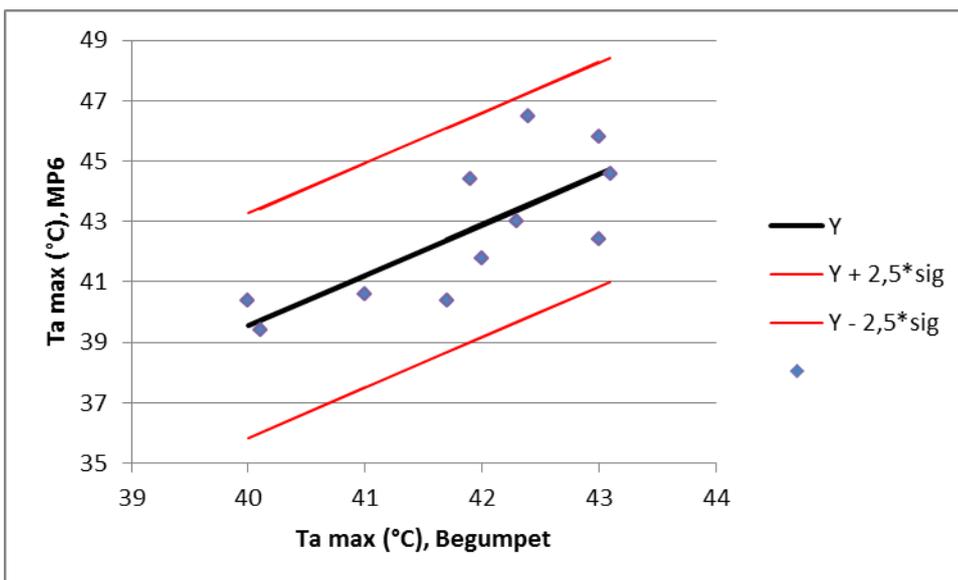
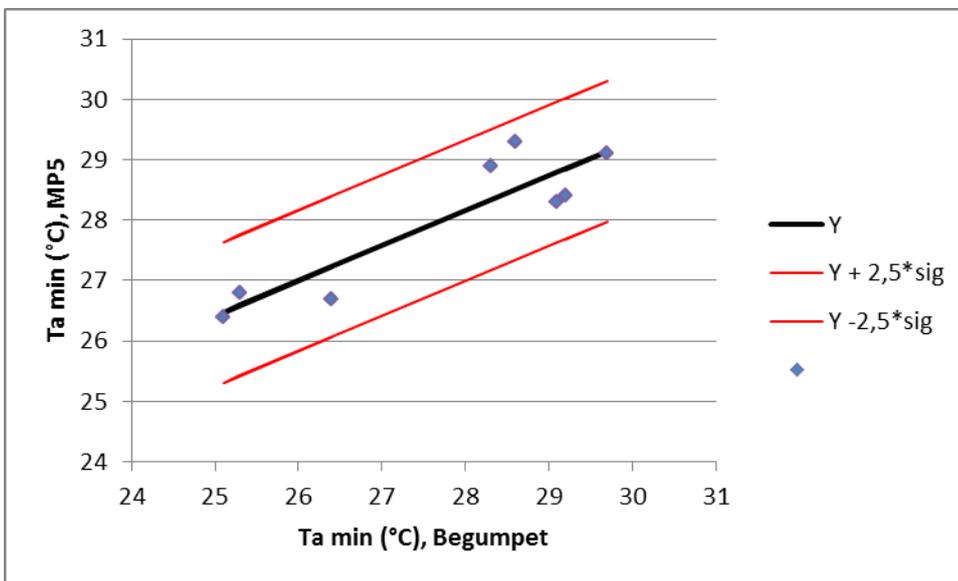
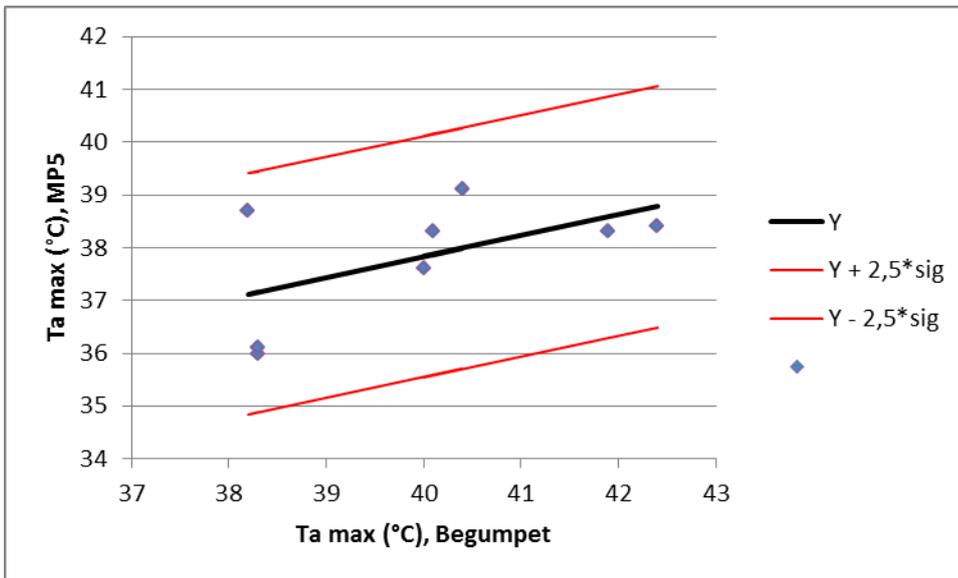
# Appendix

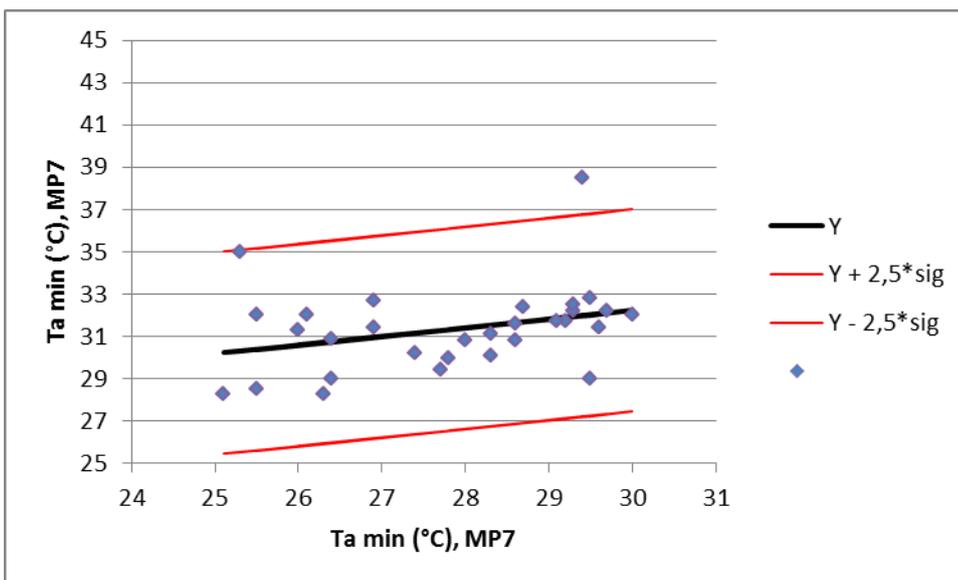
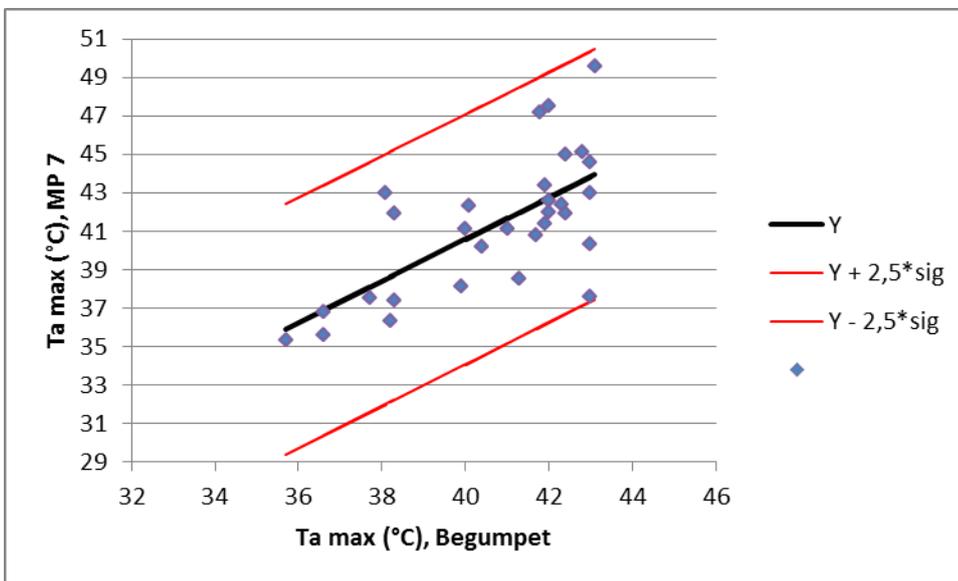
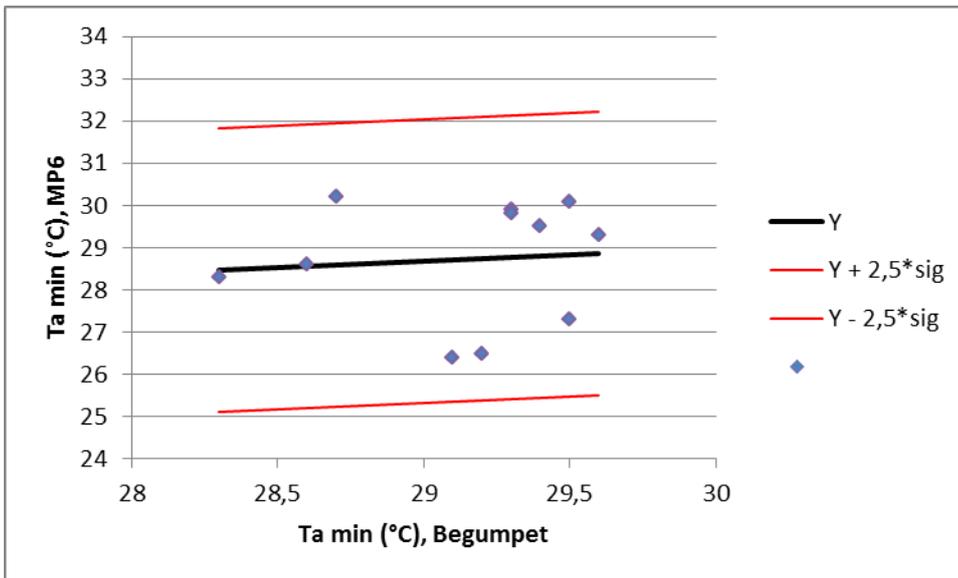
## Appendix 1: Berechnung von Ausreißern

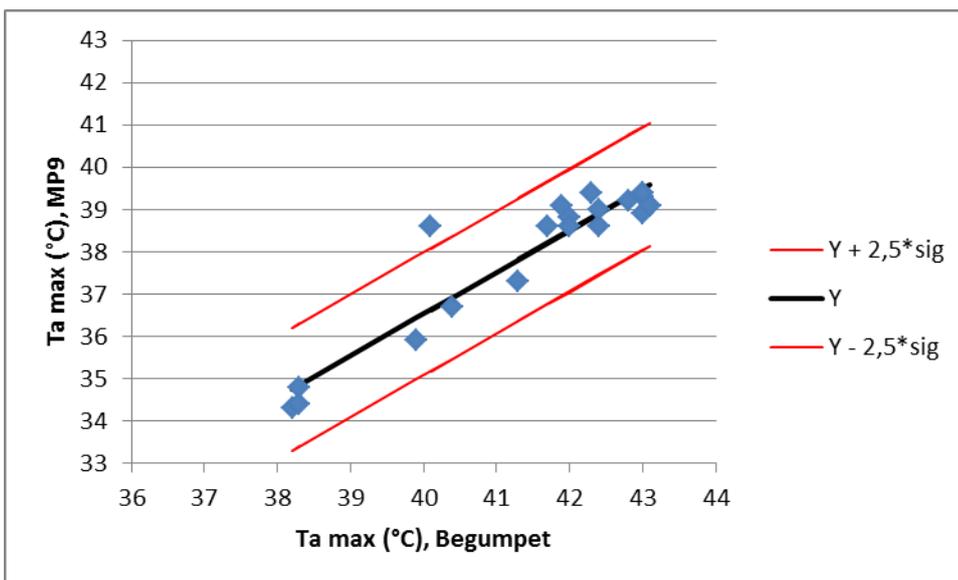
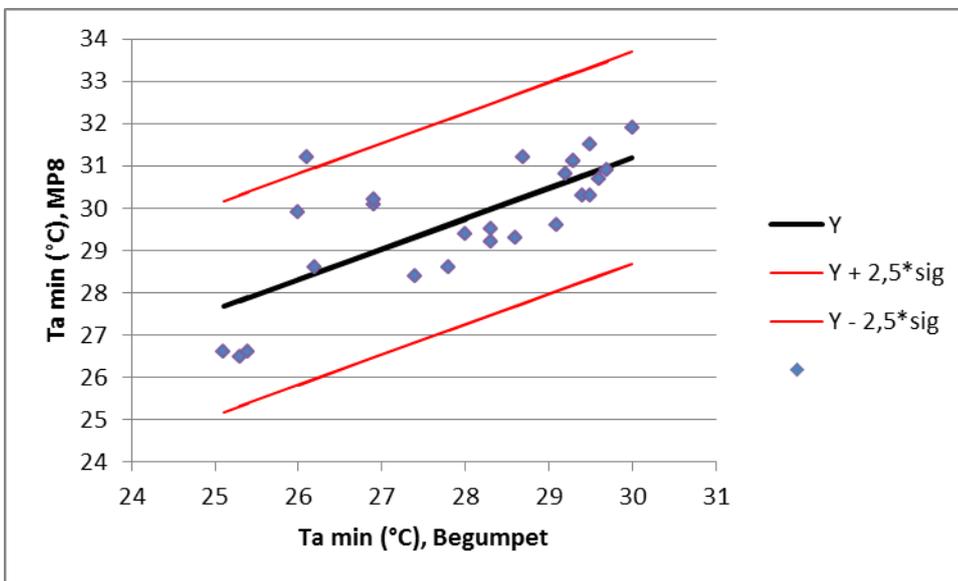
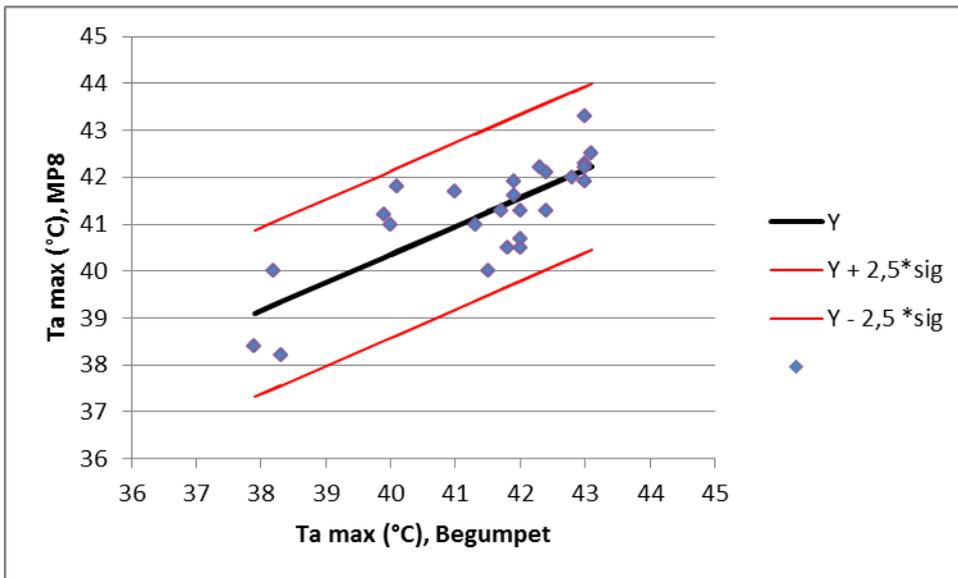


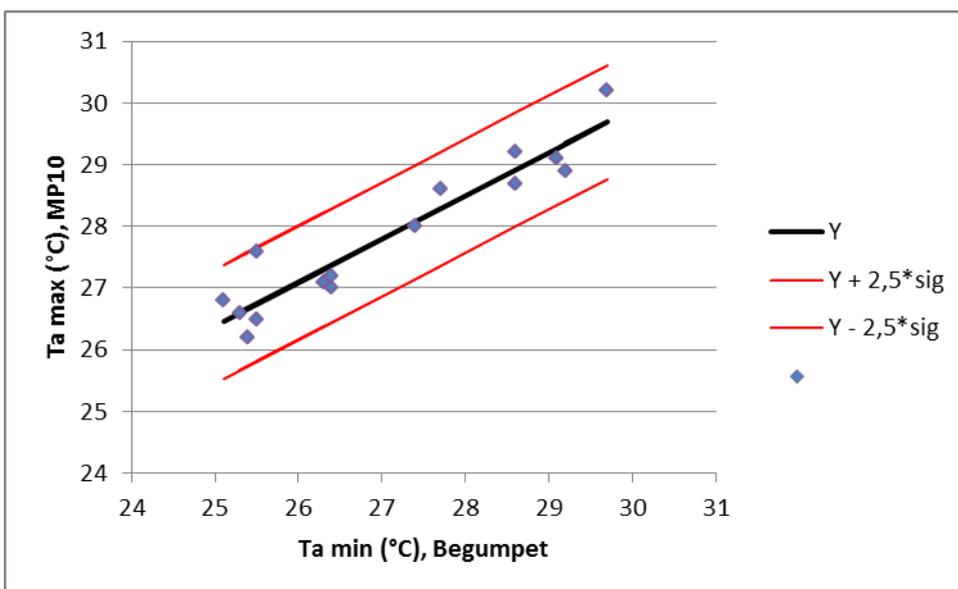
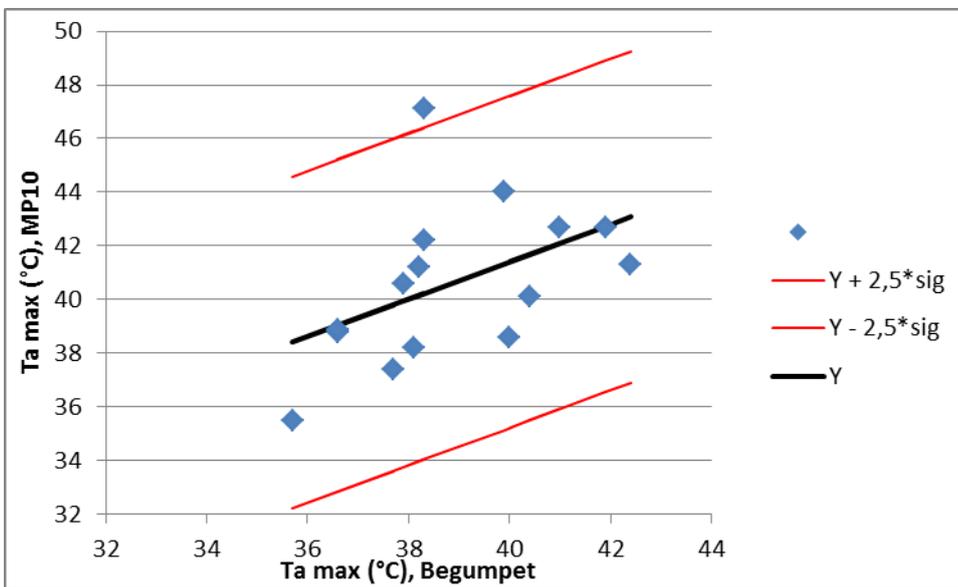
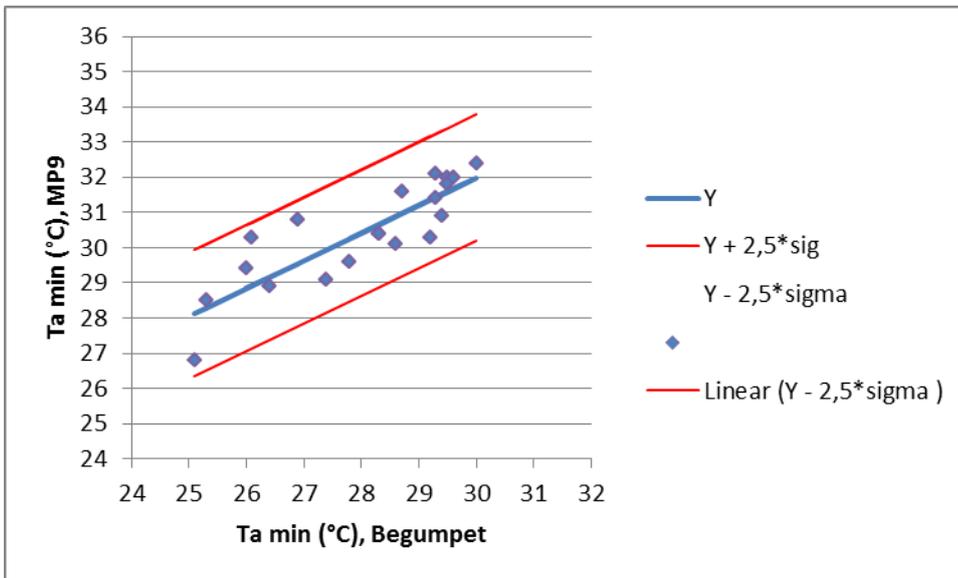




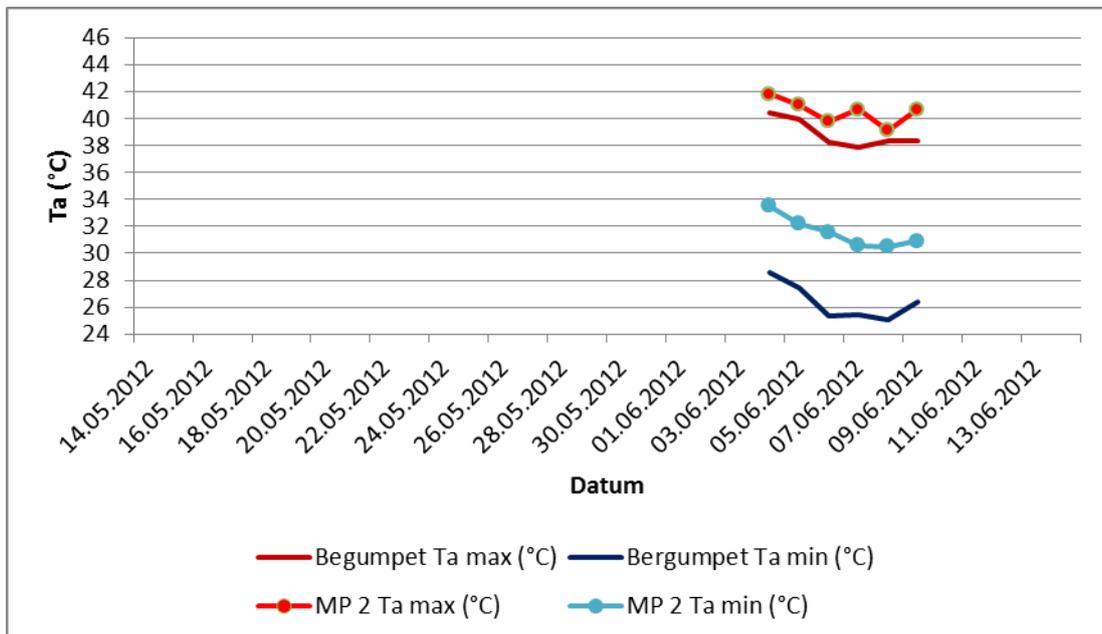
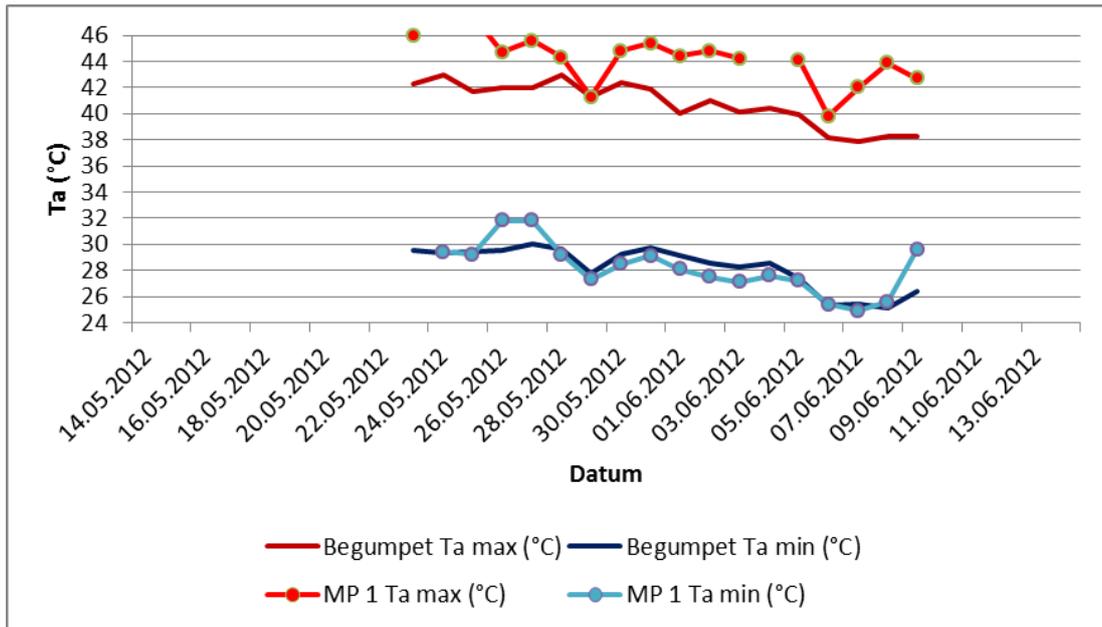


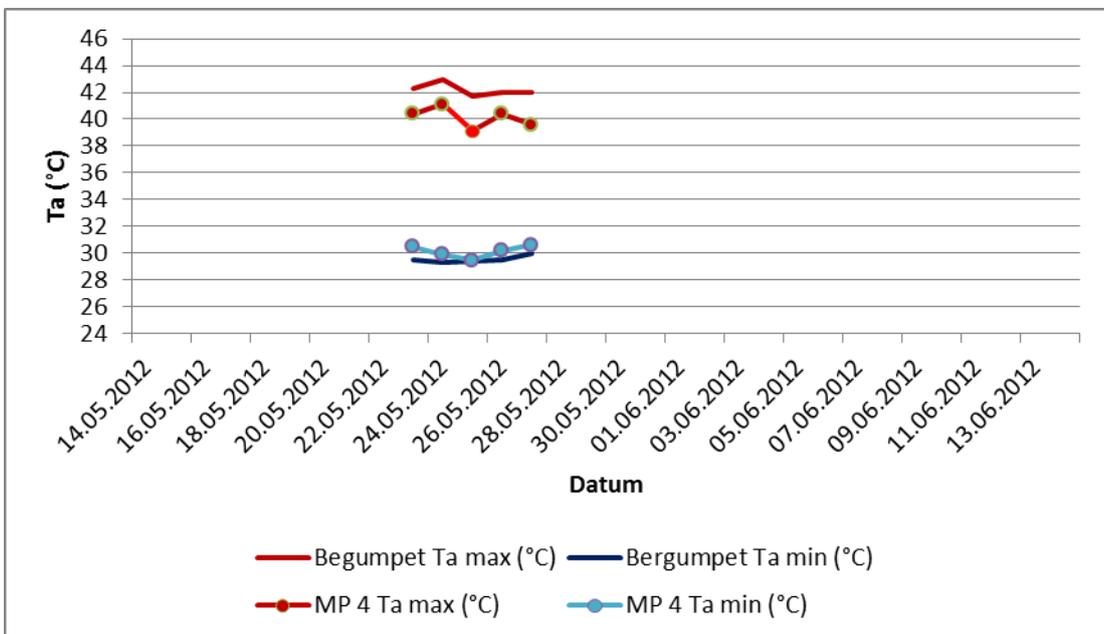
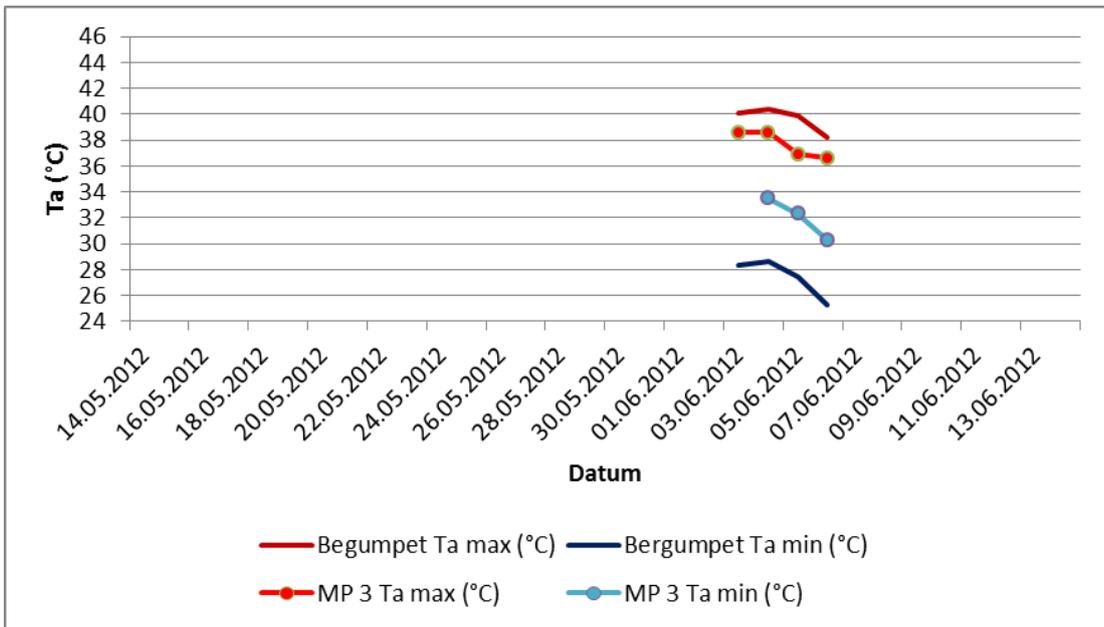


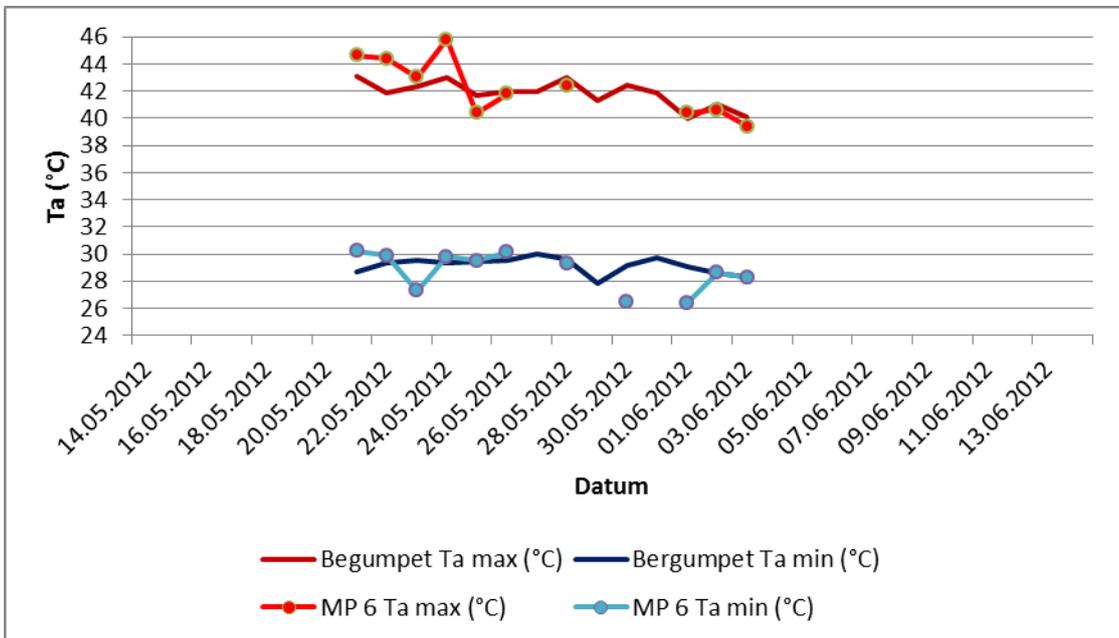
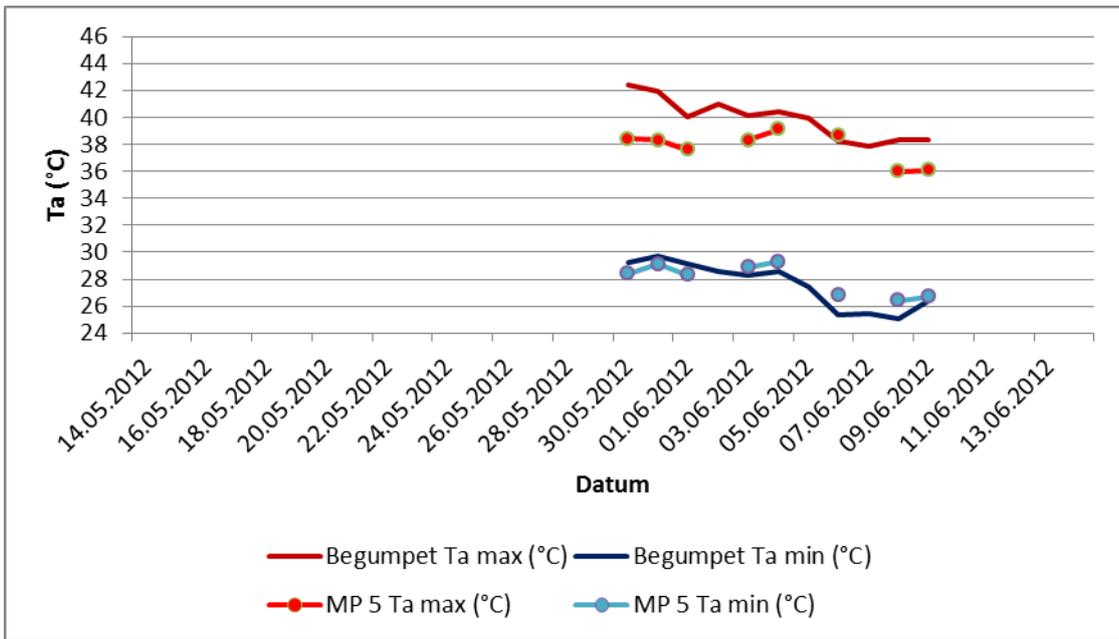


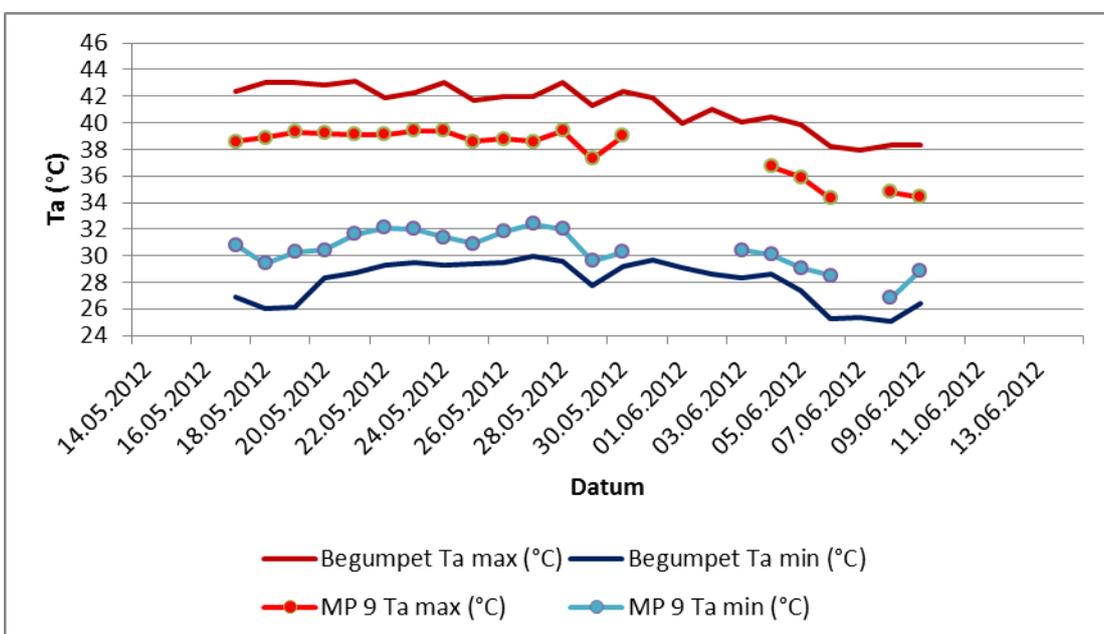
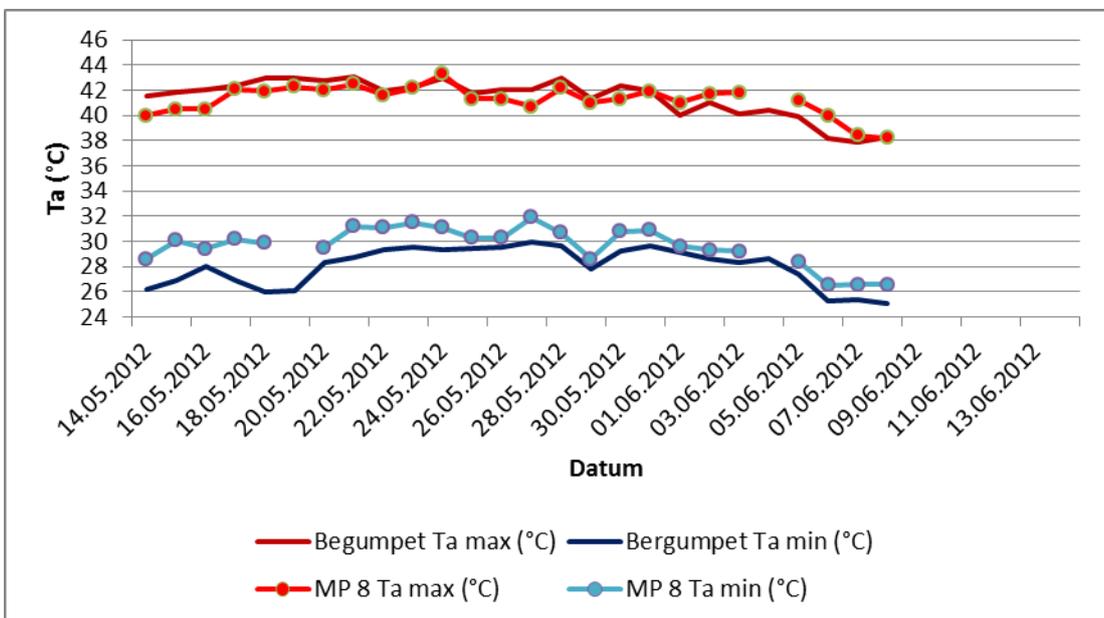
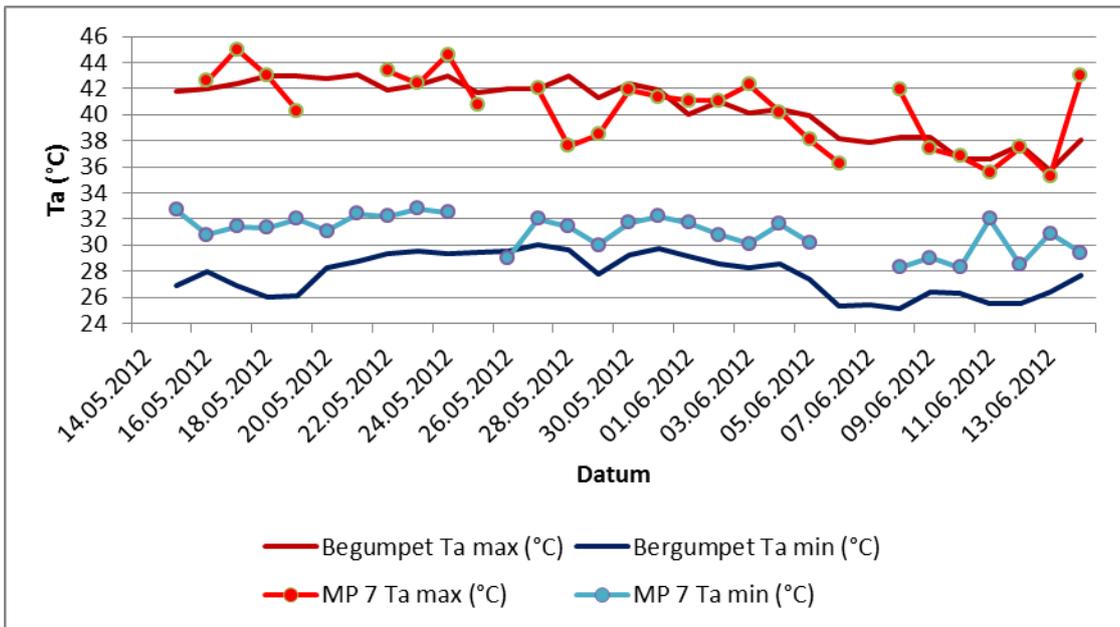


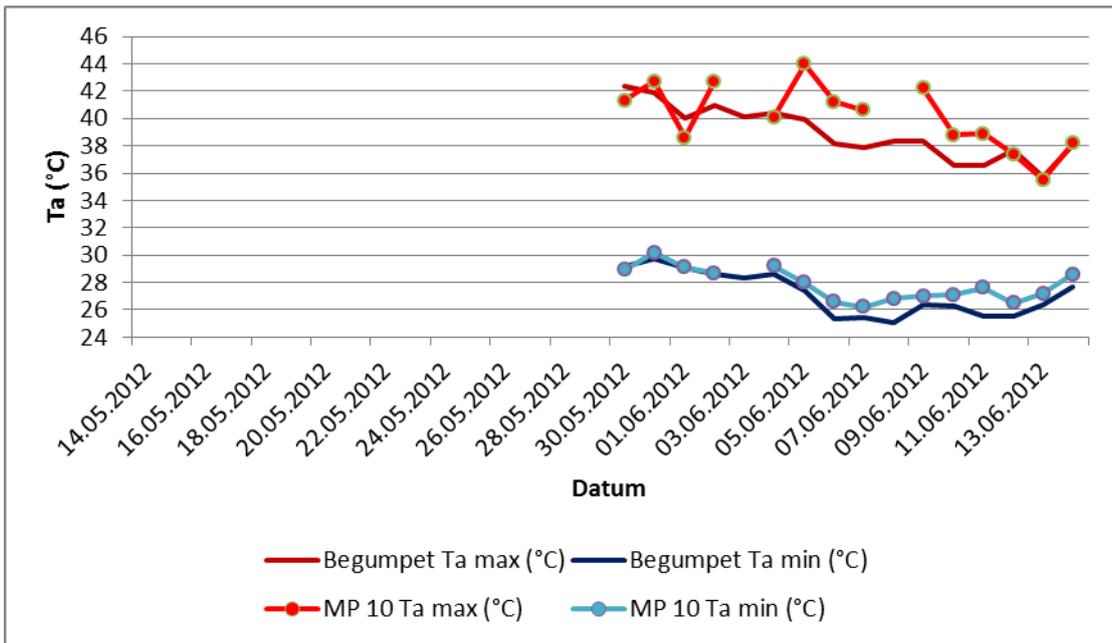
## Appendix 2: Zeitreihen Begumpet/MP



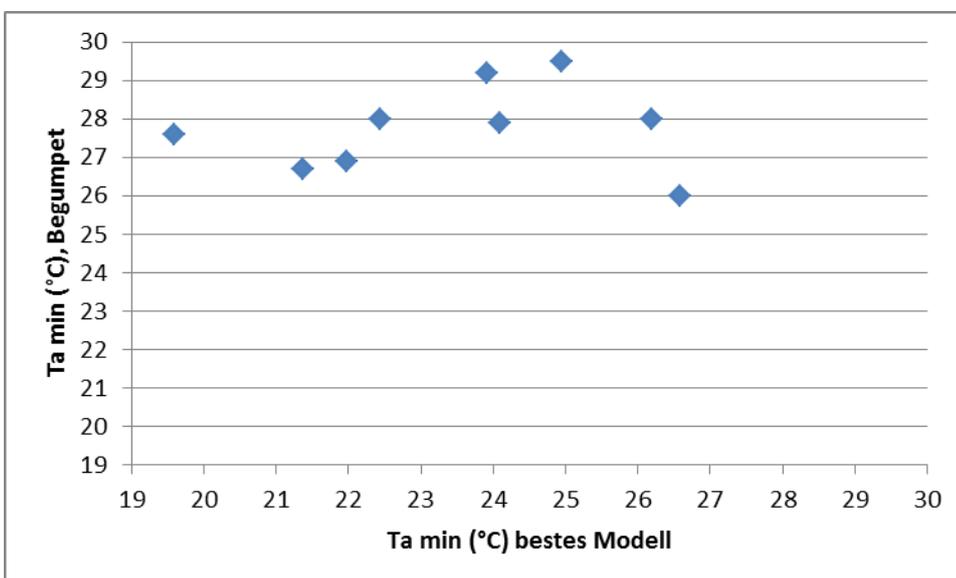
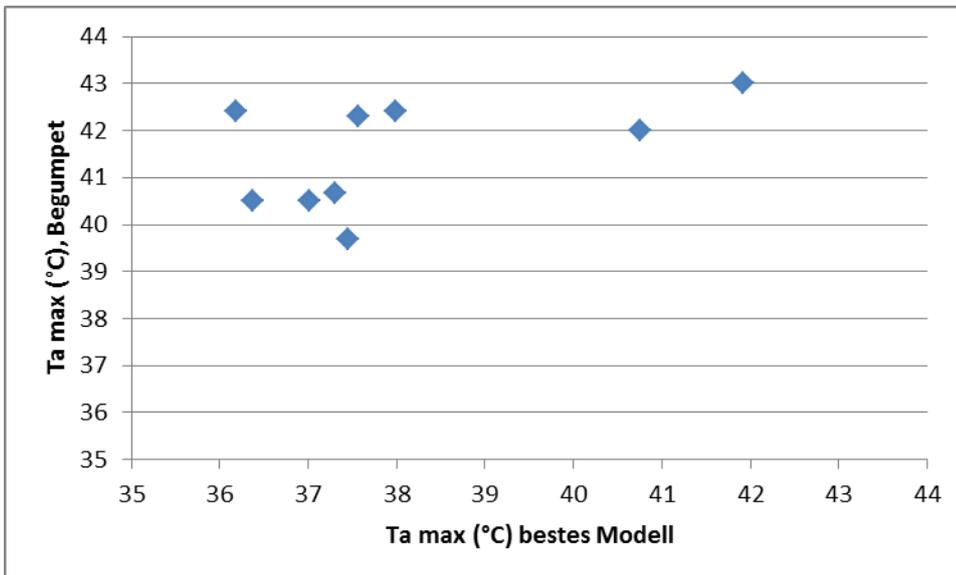


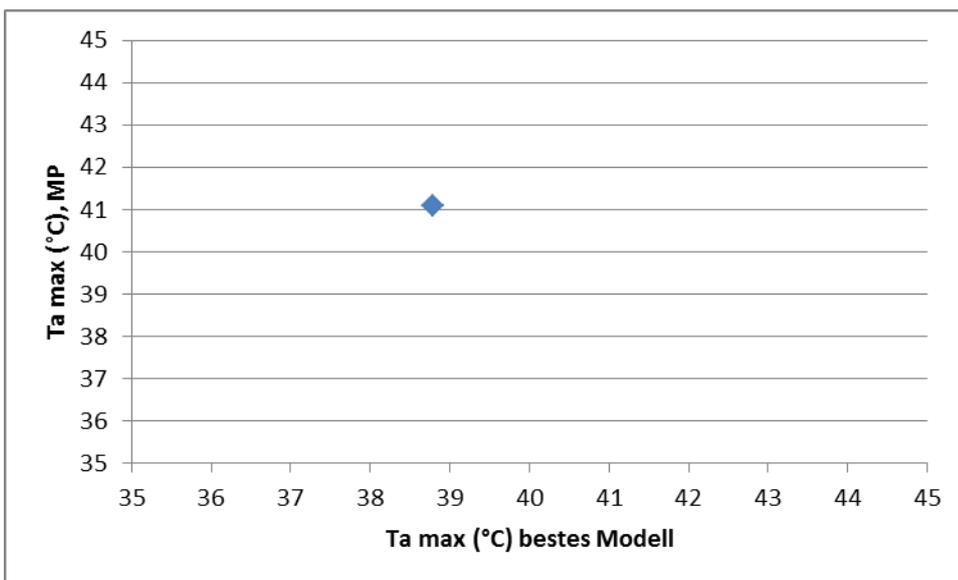
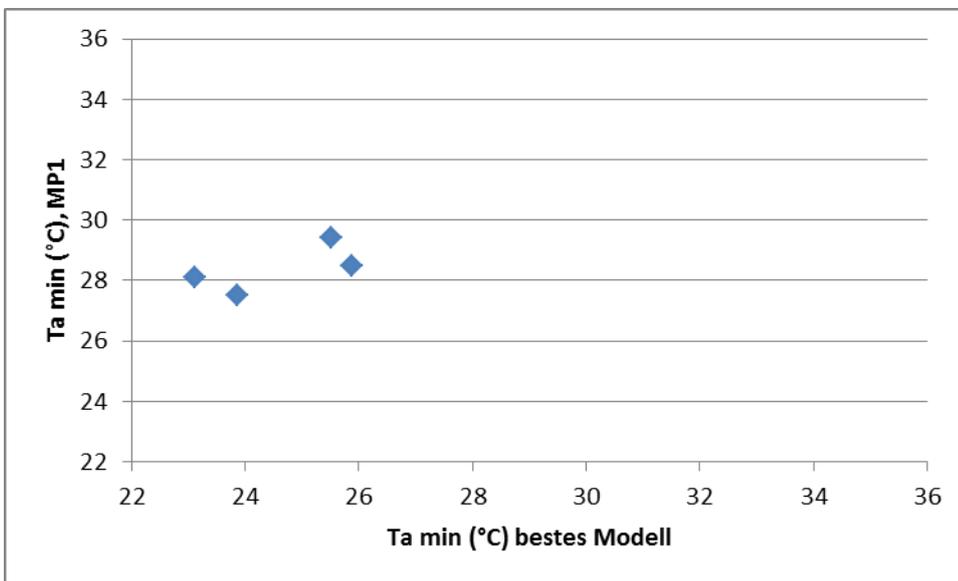
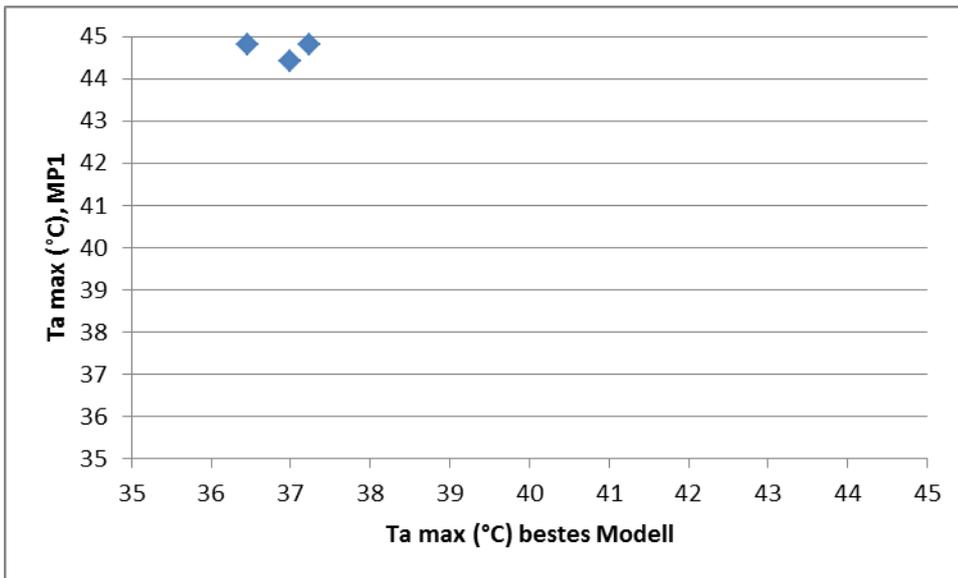


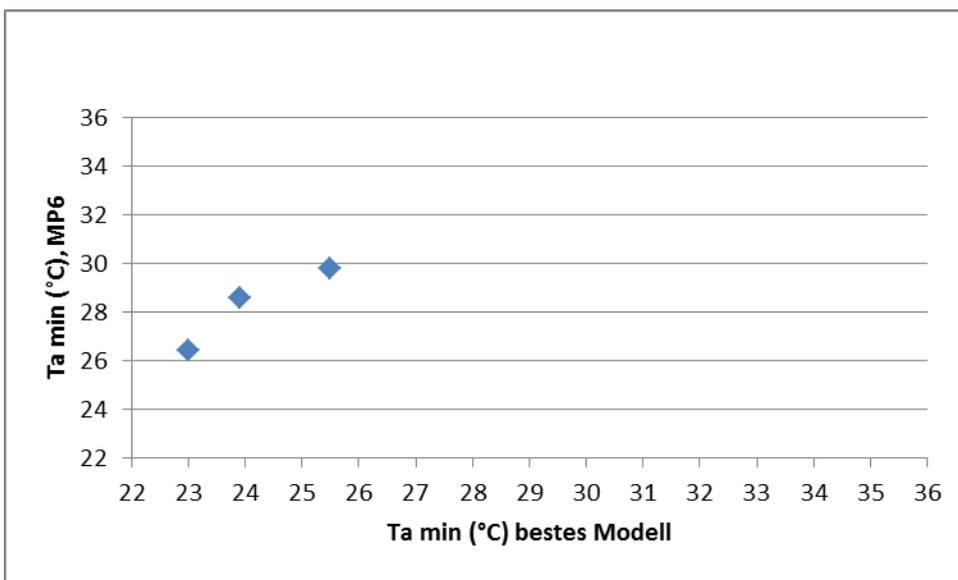
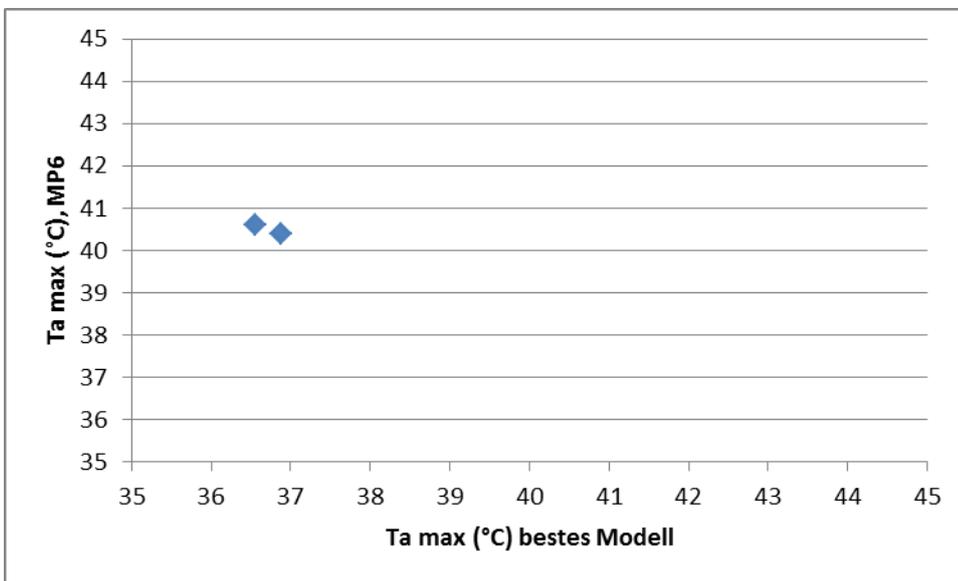
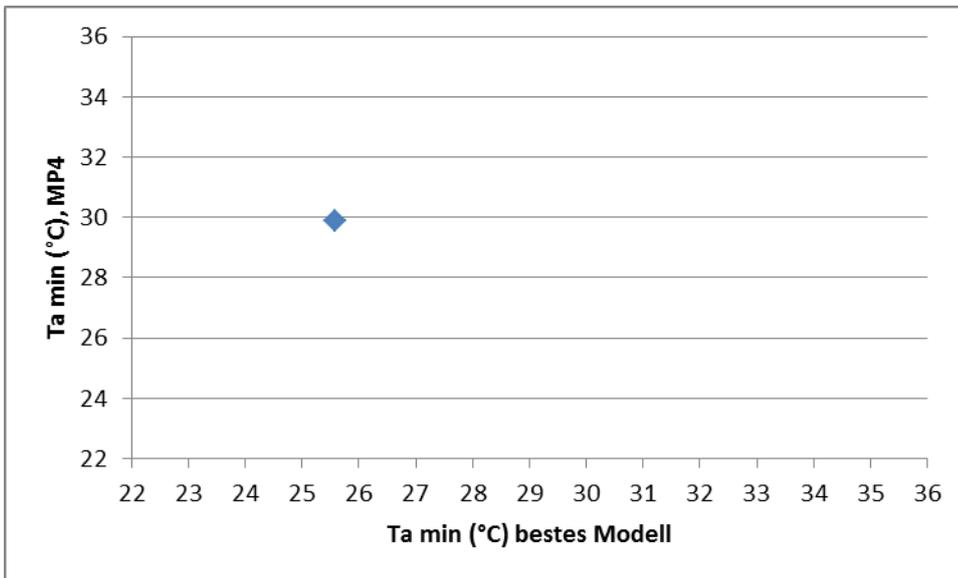


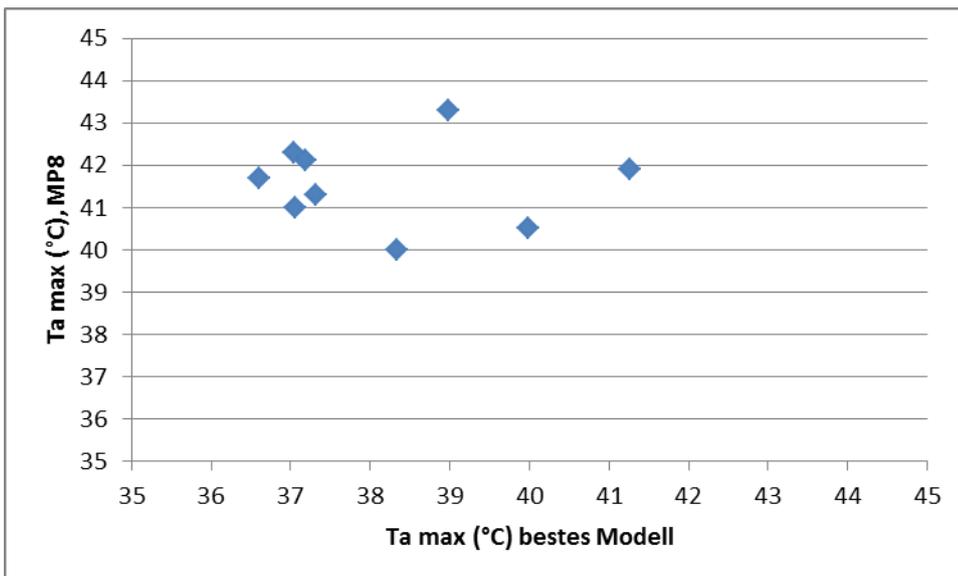
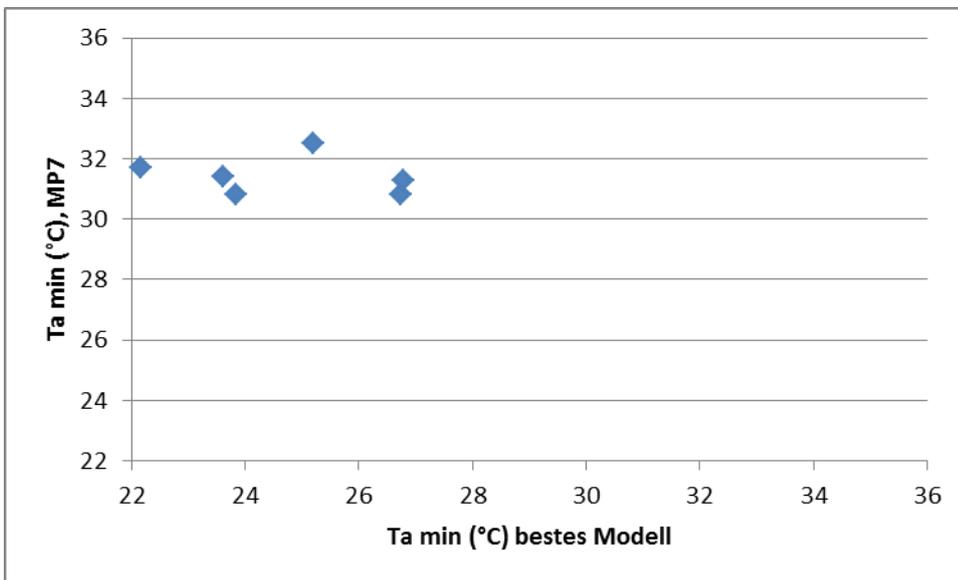
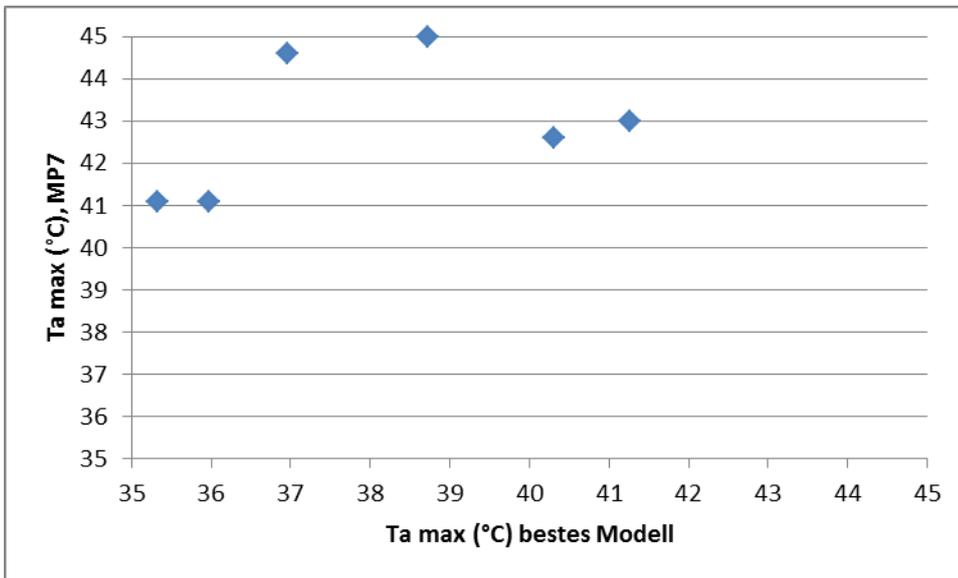


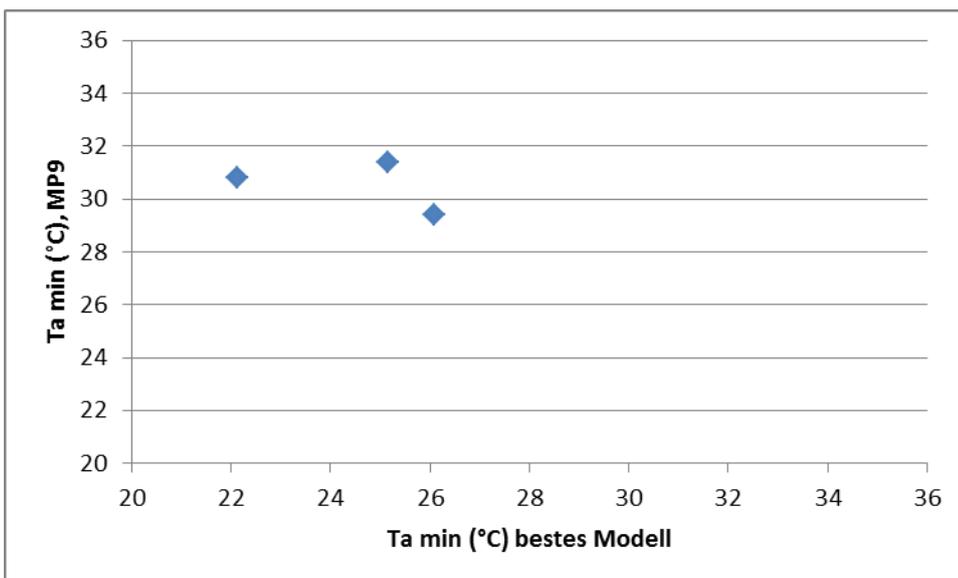
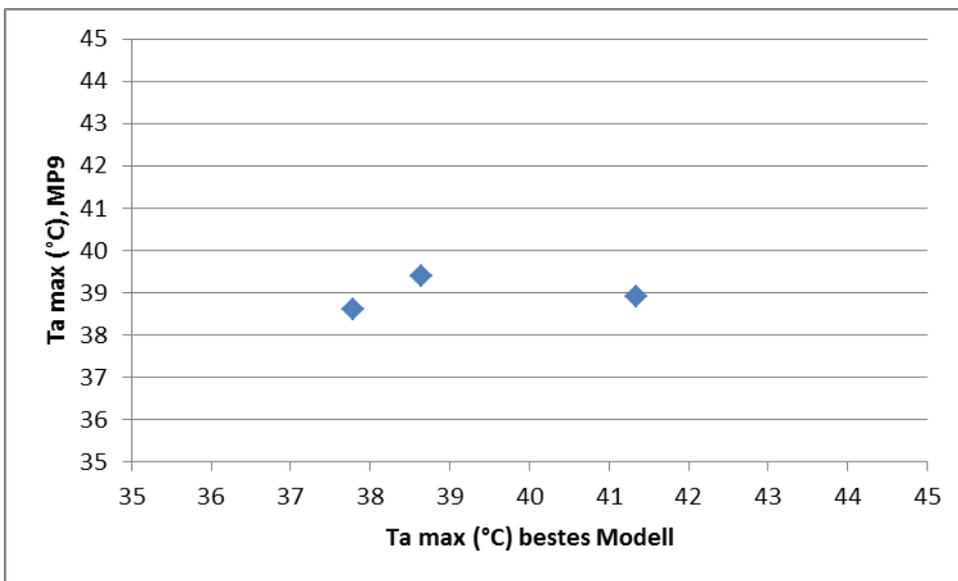
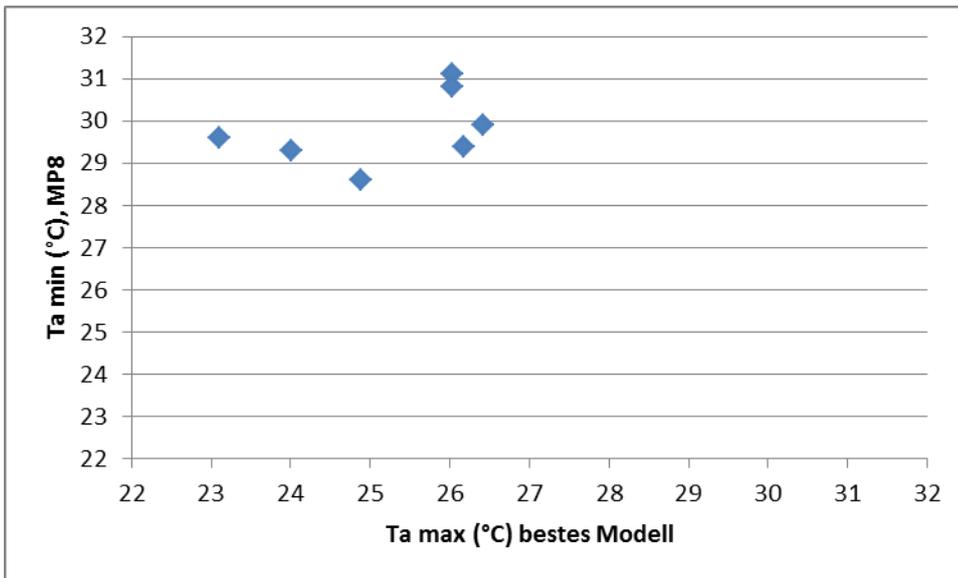
### Appendix 3: MODIS bestes Modell/T<sub>a</sub>

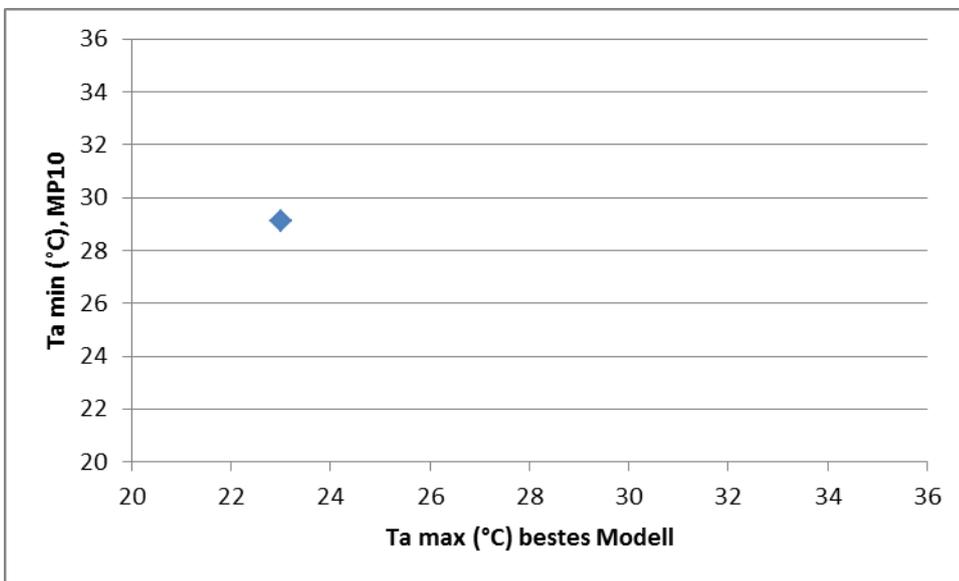
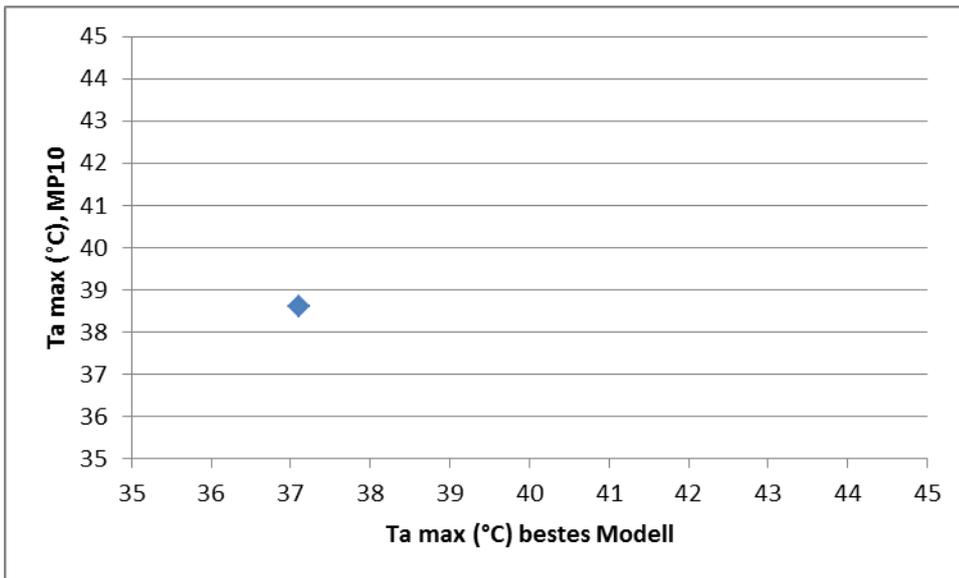












## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel verwendet habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe. Darüber hinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, bereits für eine andere Prüfung angefertigt wurde.

Freiburg, 01.10.2012

---

Felix Bostel