

ER3DS

Emissionsreduktion in Smart Cities mit räumlicher 3D-Erfassung und Analyse

SCHLUSSBERICHT



**UNIVERSITÄT
HEIDELBERG**
ZUKUNFT
SEIT 1386

Zuwendungsempfänger Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg	Förderkennzeichen 01DO19001
Vorhabensbezeichnung ER3DS	
Laufzeit des Vorhabens 01.01.2019 - 31.12.2021	
Projektleitung Prof. Dr. Bernhard Höfle	
Taiwanesische Projektkoordinatoren Prof. Chi-Kuei Wang, Institut für Geomatik, National Cheng Kung University (NCKU) (PI) Prof. Tzu-Ping Lin, Institut für Architektur, National Cheng Kung University (NCKU) (Co-PI)	

Autor*innen: K. Anders, B. Höfle

ORCID: K. Anders (0000-0001-5698-7041), B. Höfle (0000-0001-5849-1461)

Zitation:

Anders, K. & Höfle, B. (2022): ER3DS – Emissionsreduktion in Smart Cities mit räumlicher 3D-Erfassung und Analyse. Projektbericht. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. 18 S. DOI: 10.11588/heidok.00031672.

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung des Vorhabens	3
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Voraussetzungen	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4 Ausgehender wissenschaftlicher und technischer Stand	5
1.4.1 3D-Berechnung von Solarpotenzial	5
1.4.2 Evaluierung des thermischen Komforts an öffentlichen Plätzen	6
1.4.3 Bedeutung und Management von Stadtvegetation	6
2. Ergebnisse	6
2.1 Nutzung erneuerbarer Energien im städtischen Raum	7
2.1.1 Workshop in Heidelberg	7
2.1.2 Workshop in Taiwan	8
2.1.3 Austauschtreffen mit Akteur*innen in Taiwan	8
2.2 Nutzbarkeit öffentlicher Plätze angesichts steigender Sommerhitze	11
2.2.1 Vergleichende Studie zum thermischen Komfort an öffentlichen Plätzen in Tainan und Heidelberg	11
2.2.2 Methodik zur Entwicklung von Adaptionstrategien für öffentliche Plätze	11
2.3 Management von Stadtvegetation unter zunehmendem Hitzestress	12
2.3.1 Austauschtreffen mit städtischen Abteilungen des Vegetationsmanagements in Deutschland	13
2.3.2 Studie zum Umgang mit Stadtvegetation in Taiwan	13
2.4 Wissenstransfer und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses	14
2.5 Fortführung der Austauschaktivitäten und wissenschaftliche Verwertung	14
3. Fortschritt seitens Dritter	15
4. Veröffentlichungen	15
5. Literatur	16

1. Kurzdarstellung des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieses Projekts war die Integration von Wissen taiwanesischer und deutscher Wissenschaftler*innen in den Bereichen hochdetaillierte 3D-Raumerfassung und -analyse, Energieverbrauch von Gebäuden sowie Stadtklima. Wesentlich ist hier die Zusammenarbeit mit KMUs und Regierungsbehörden und die Förderung gebäudeintegrierter Photovoltaik im Kontext der Vision von Smart Cities durch gemeinsame wissenschaftliche Initiativen und Veranstaltungen.

Erneuerbare Energien sind ein sehr wichtiger Aspekt im Kontext des Klimawandels (IPCC, 2014) und des Konzepts von Smart Cities (vgl. Müller-Seitz, 2016). Insbesondere die Anbringung von Photovoltaikanlagen auf Gebäudedächern oder -fassaden für die Energiegewinnung und die Reduktion der Kohlendioxidemissionen sind hier zu nennen (Lin et al., 2017; Abb. 1a). Die Berechnung des stündlichen Solarpotenzials im Jahresverlauf stellt jedoch aufgrund komplexer und dynamischer Schatteneffekte auf Gebäudehüllen eine Herausforderung in dichten Stadtgebieten dar (Jochem et al., 2009). Der Fokus des Kooperationsprojekts richtete sich daher auf die Verwendung hochdetaillierter 3D-Stadtmodelle, die aus luftgestützten Laserscandaten generiert wurden. Das 3D-Solarpotenzial für das Stadtmodell kann mithilfe der Heidelberger Open Source Forschungssoftware VOSTOK (Voxel Octree Solar Toolkit; Bechtold & Höfle, 2020) berechnet werden (Abb. 1b).

a) Kohlenstoffemissionen im städtischen System

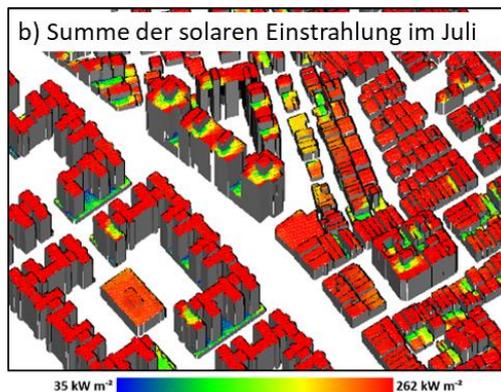
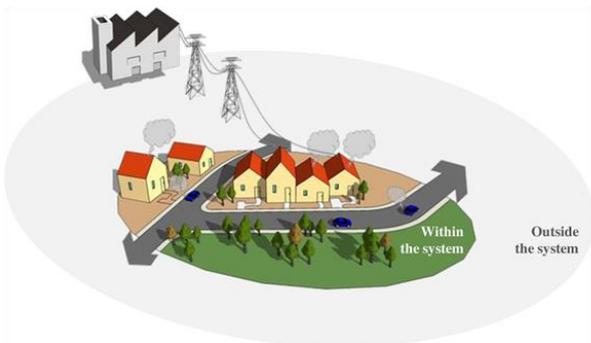


Abbildung 1: (a) Konzept der Kohlenstoffemissionen im städtischen System (Lin et al., 2017) und (b) monatliche Summe der solaren Einstrahlung im Monat Juli (Lin et al., 2017).

Das ursprüngliche Ziel in ER3DS war es mehrere gemeinsame Workshops und Feldexperimente durchzuführen, ebenso wie Software-Trainingsprogramme. Dies ermöglicht die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses (Master- und PhD-Studierende) auf hohem wissenschaftlichem Niveau. Der urbane Kontext in Taiwan stellt zudem eine neue wissenschaftliche Herausforderung für existierende Methoden der 3D-Solarpotenzialberechnung dar und soll helfen, die Robustheit und Übertragbarkeit dieser Methoden zu erweitern. Intensiver Wissensaustausch zwischen den Projektpartner*innen ermöglicht somit die Entwicklung völlig neuer Konzepte für die Extraktion von Geoinformation. Da ein Teil der geplanten Projektaktivitäten aufgrund der weltweiten Pandemielage nicht umgesetzt werden konnten (s. Abschnitt 1.3), wurden die Ziele des Projekts in zwei Aspekten ausgebaut bzw. neu formuliert:

- 1) Im weiteren Kontext des Stadtklimas und dessen Einfluss auf den Menschen, wurden Untersuchungen zum thermischen Komfort in öffentlichen Bereichen von Städten durchgeführt. Dies umfasst insbesondere eine Vergleichsstudie zwischen der Stadt Heidelberg in Deutschland und der Stadt Tainan in Taiwan. Hier wurden die mikroklimatischen Bedingungen an jeweils einem öffentlichen Platz und existierende Maßnahmen zur Hitzereduzierung untersucht. An diese Thematik knüpft eine Pilotstudie an, welche die Nutzbarkeit öffentlicher Plätze am Fallbeispiel Heidelbergs angesichts zunehmender Sommerhitze untersucht und Adaptionsszenarien modelliert.
- 2) In Hinblick auf die wichtige Funktion von Stadtvegetation, insbesondere Bäumen, wurde eine zusätzliche Studie des städtischen Vegetationsmanagements durchgeführt. Zunehmender Hitzestress führt in deutschen Städten verstärkt zu dauerhaftem Schaden an Baumvegetation. Neue Strategien, zum Beispiel einer gezielteren Bewässerung, unter Einsatz von digitalen Geotechnologien und dauerhaftem Monitoring kann hier zu einer langfristigen Verbesserung des Zustands und der Instandhaltung von Stadtvegetation beitragen. Hierzu wurde eine Vorstudie des aktuellen Stadtvegetationsmanagements mit Stadtverwaltungen mehrerer deutscher Städte sowie mit den taiwanesischen Partner*innen durchgeführt.

Somit erweiterte das interdisziplinäre Projekt die Kompetenzen der Projektpartner*innen in mehreren Bereichen von 3D- und allgemein Geodaten-basierter Erfassung und Analyse von Smart Cities im Hinblick auf einen i) methodischen und ii) geographischen Wissensaustausch. Daraus können anschließend an das Projekt sowohl angewandte, als auch Grundlagenforschungsprojekte als gemeinsame Initiativen entwickelt werden.

1.2 Voraussetzungen

Das Austauschprojekt basiert auf früherer Zusammenarbeit zwischen den Partner*innen aus Deutschland und Taiwan durch personelle Austauschprogramme (Masterstudierende und Promovierende) und gemeinsame Organisation von Workshops und Sommerschulen.

Aus dieser Vorarbeit sind folgende gemeinsame Publikationen vorhanden:

Lin, T.-P., Lin, F.-Y., Wu, P.-R., Hämmerle, M., Höfle, B., Bechtold, S., Hwang, R.-L., & Chen, Y.-C. (2017): Multiscale analysis and reduction measures of urban carbon dioxide budget based on building energy consumption. *Energy and Buildings*, 153, 356-367. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.084.

Hämmerle, M., Lukač, N., Chen, K.-C., Koma, Zs., Wang, C.-K., Anders, K., & Höfle, B. (2017): Simulating various terrestrial and UAV LiDAR scanning configurations for understory forest structure modelling. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W4, 59-65. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-59-2017.

Seit 2015 besteht eine offizielle Absichtserklärung (Memorandum of Understanding) zwischen der Fakultät für Chemie und Geowissenschaften der Universität Heidelberg und der Faculty of Science sowie Faculty of Engineering der National Cheng Kung University (NCKU).

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Design des Projekts beinhaltet sowohl gemeinsame i) Forschung als auch ii) Lehraktivitäten, die eng zusammengehören. Öffentliche Behörden und KMUs werden als Akteur*innen in Workshops und Ausbildungsaktivitäten eingebunden, um wissenschaftliche Ergebnisse und entwickelte Werkzeuge Endnutzer*innen in Smart Cities nahe zu bringen. Die wertvolle Rückmeldung der Verwaltungsbehörden von Städten werden kontinuierlich in Projektaktivitäten integriert.

Folgende Aktivitäten wurden im geplanten Projektablauf durchgeführt:

Zeitraum	Tätigkeiten	Ort
25.03.2019 bis 28.03.2019	Auftaktworkshop Vorlesungs- und Seminareinheiten	Heidelberg
16.09.2019 bis 19.09.2019	Ausbildungsworkshop	Tainan

Ursprünglich weitere geplante Aktivitäten ab Sommer 2020 konnten aufgrund der weltweiten Covid-19 Pandemie nicht umgesetzt werden:

Zeitraum	Tätigkeiten	Ort
Sommer 2020	Internationale Sommerschule für Promovierende mitveranstaltet vom Heidelberg Center for the Environment (HCE) und Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR)	Heidelberg
Herbst 2020	Wissenschaftlicher Workshop mit weiterreichenden Aktivitäten	Tainan

Der Austausch von Promovierenden in der Projektlaufzeit war aufgrund der Reiseeinschränkungen ebenso nicht möglich, findet aber in geänderter Form (Forschungsaufenthalt im Rahmen einer Bachelorarbeit, s. Abschnitt 2.4) sowie im Anschluss an das Projekt statt (Forschungsbesuch einer Doktorandin der NCKU an der Universität Heidelberg, s. Abschnitt 2.5).

1.4 Ausgehender wissenschaftlicher und technischer Stand

1.4.1 3D-Berechnung von Solarpotenzial

Sonnenschatten und Okklusionseffekte zwischen Gebäuden auf detaillierter räumlicher Ebene, also einschließlich einzelner Gebäude bis zu mehreren Gebäuden, können mithilfe hochmoderner 3D-Stadtmodelle berücksichtigt werden. Das Solarpotenzial kann darauf basierend mit hoher Präzision berechnet und bewertet werden (Jochem et al., 2009). Folglich können Photovoltaikanlagen an jedem Gebäude mit geeigneter Lage und Ausrichtung angebracht werden (Lin et al., 2017). Die Hochskalierung einer solchen Berechnung auf einen städtischen Maßstab ist jedoch eine anspruchsvolle Herausforderung, da die Aufbereitung der 3D-Stadtmodelle und des intelligenten Algorithmus eine effiziente Lösung hinsichtlich der Ge-

naugigkeit und des Rechenaufwandes bedarf. Derzeit fehlt es noch an 3D-Solarpotenzialberechnungen zur Kohlenstoffdioxidreduktion auf einem städtischen Maßstab mit mehr als 1 Million Einwohner*innen.

1.4.2 Evaluierung des thermischen Komforts an öffentlichen Plätzen

Zunehmende Hitze durch den fortschreitenden Klimawandel beeinträchtigt verstärkt städtische Gebiete (Revi et al., 2014; Seto et al., 2014). Die Folgen sind mitunter ein höherer Energieverbrauch, der zur Abkühlung von Gebäude oder Räumen aufgewendet wird, sowie das Auftreten hitzebedingter Krankheiten oder Gesundheitsschäden (Mohajerani et al., 2017). Hitzestress beeinträchtigt die Bevölkerung insbesondere an öffentlichen Plätzen, die jedoch wiederum wesentlich sind in ihrer sozialen und wirtschaftlichen Funktion sowie positiven Wirkung auf die Umwelt. Ein wichtiger Faktor für die Nutzbarkeit öffentlicher Plätze im städtischen Raum ist der thermische Komfort (Kántor et al., 2018; Nikolopoulou & Steemers, 2003). Dieser kann durch die Beobachtung mikroklimatischer Bedingungen abgeleitet werden. Die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen dem städtischen Mikroklima und dem thermischen Komfort der Bevölkerung erlaubt eine verbesserte Planung von Maßnahmen zur Reduzierung von Hitzestress und kann eine langfristige Nutzbarkeit öffentlicher Plätze sicherstellen (Matzarakis & Endler, 2010). Diese Aspekte werden hier erstmals in einem transdisziplinären Ansatz und vergleichend zwischen Deutschland und Taiwan untersucht, mit sehr unterschiedlichen klimatischen Bedingungen und Graden der Urbanisierung von Städten.

1.4.3 Bedeutung und Management von Stadtvegetation

Pflanzen sind ein wesentlicher Faktor zur Verbesserung des Stadtklimas im Sinne des Mikroklimas (Gillner et al., 2015). Urbane Vegetation ist wichtig für die Luftqualität, den städtischen Wasserhaushalt, die direkte Gebäudekühlung sowie das Wohlbefinden und die psychische Gesundheit der Menschen in der Stadt (Lai et al., 2019; Nikolopoulou & Lykoudis, 2006). Insbesondere Bäume können den Stress aufgrund urbaner Hitzeinseln reduzieren (Kuttler, 2008). Jedoch gerät die urbane Vegetation – insbesondere Bäume – in heißen Sommern zunehmend unter Hitze- und Dürrestress. Die vielfältigen Funktionen von Vegetation sind dadurch kurzfristig beeinträchtigt oder durch Absterben sogar komplett bedroht. Um Stadtbäume vor allem unter zunehmendem Hitzestress in ihrer Vitalität zu erhalten wird eine Verbesserung der Bewässerungsstrategie zunehmend wichtig (Quesnel et al., 2019). Das Management von Bäumen unterliegt limitierten Ressourcen (v.a. Wasser und Personal) und die aktuell gängige Vorgehensweise kann dem zu erwartenden, steigenden Bedarf der Bewässerung der kommenden Jahre nicht gerecht werden. Bislang werden auf Stadtebene noch keine digitalen Geosensoren operationell eingesetzt, um die Bewässerung von Vegetation gezielter und damit effizienter umzusetzen. Erste Austauschtreffen und Informationsgewinnung mit Verantwortlichen und Expert*innen in Deutschland und Taiwan können hier wichtiges Vorwissen für zukünftige Aktivitäten beitragen.

2. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Projektaktivitäten vorgestellt. Dies beinhaltet die drei Aspekte der Projektfragestellungen, also die Nutzung erneuerbarer Energien im städtischen Raum (Abschnitt 2.1), Mikroklima und thermischer Komfort an öffentlichen Plätzen

deutscher und taiwanesischer Städte (Abschnitt 2.2), und das Management von Stadtvegetation (Abschnitt 2.3) angesichts ihrer Bedeutung für das städtische Klima. Die darauffolgenden Abschnitte geben eine Übersicht über erfolgreichen Wissenstransfer und Förderung wissenschaftlichen Nachwuchses (Abschnitt 2.4) sowie die Fortführung der Austauschaktivitäten und wissenschaftliche Verwertung (Abschnitt 2.5).

2.1 Nutzung erneuerbarer Energien im städtischen Raum

Die Projektaktivitäten zum Thema hochdetaillierte 3D-Raumerfassung und -analyse, Energieverbrauch von Gebäuden sowie Stadtklima fanden im Wesentlichen im Rahmen von Workshops und weiteren Austauschtreffen mit Akteur*innen, also Behörden und KMUs, in Taiwan statt.

2.1.1 Workshop in Heidelberg

Der Auftaktworkshop im März 2019 (26.03.2019) ermöglichte es, Wissen aus der Geographie und Geoinformatik, Architektur, Planung und Umwelt, Gebäudeenergie und von Stadtklimaexpert*innen aus Taiwan und Deutschland für zukünftige Forschungsaktivitäten und Anwendungen zu integrieren. Die Organisation fand gemeinsam mit dem TdLab Geographie (Dr. Nicole Aeschbach) statt, womit der transdisziplinäre Austausch zwischen den verschiedenen Teilnehmenden maßgeblich gestärkt werden konnte. Mit Teilnehmenden vertreten waren neben den Forschungsgruppen der Projektkoordinatoren u.a. der Forschungsbereich Meteorologie durch Prof. Matzarakis (DWD), das Umweltamt der Stadt Heidelberg (Dr. Raino Winkler), die Stadtwerke und das Vermessungsamt Heidelberg, sowie das Unternehmen Aeromey (Befliegungsfirma zur Erfassung von 3D-Geodaten mit Beteiligung in Forschungsprojekten).

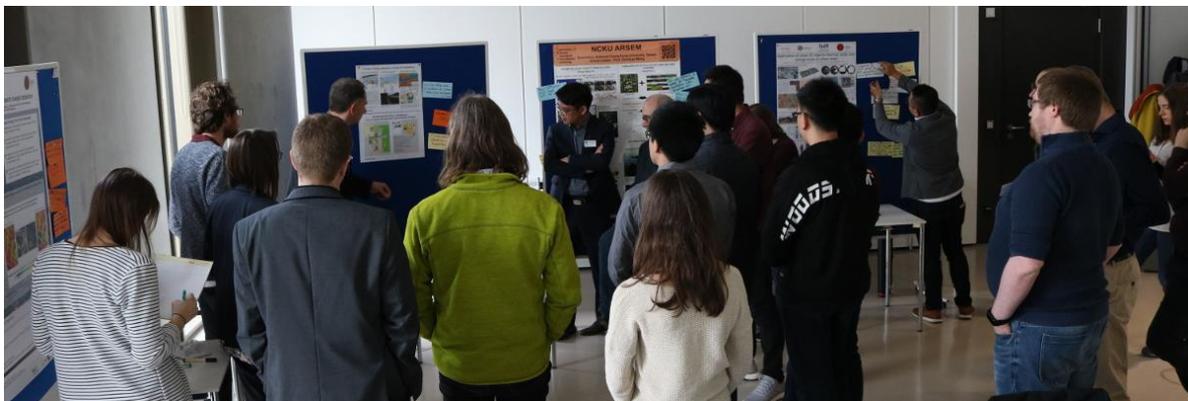


Abbildung 2: Expert*innen-Marktplatz im Rahmen des ER3DS-Workshops in Heidelberg zum Austausch zwischen Wissenschaft, Unternehmen und Behörden. Foto: V. Zahs (26.03.2019).

Die ausgewählten Referent*innen und Teilnehmenden aus dem akademischen Bereich, KMUs und Behörden wurden zusammengebracht, um die (zukünftige) Rolle von 3D-Geodaten und 3D-Analysen für die Emissionsreduzierung im Smart-City-Kontext (z.B. intelligente gebäudeintegrierte Photovoltaik) zu bewerten. Als Ergebnis des transdisziplinären Workshops wurde Know-how aus verschiedenen Richtungen ausgetauscht und bestehende und neue (gemeinsame) Anwendungsbeispiele identifiziert. Darüber hinaus wurden neue Projekt-

partner*innen in Heidelberg und Taiwan zusammengebracht und somit die Grundlage geschaffen, die wichtigsten Herausforderungen zwischen Wissenschaft und Praxis sowie zwischen Deutschland und Taiwan anzugehen.

2.1.2 Workshop in Taiwan

Im Rahmen des zweiten Projekt-Workshops, der im September 2019 (17.09.2019) in Taiwan stattfand, präsentierten die Projektkoordinatoren und Nachwuchswissenschaftler*innen ihre Forschung zum ER3DS-Thema mit besonderem Fokus auf die Situation in Taiwan. Das Programm umfasste einen Vortrag von Prof. Lin über die Bedeutung lokaler Winde, insbesondere zwischen Gebäuden, für das Stadtklima in Taiwan, die in der Stadtplanung berücksichtigt werden sollten. Weitere Themen im Workshop waren die soziale Verantwortung der Universität sowie methodische Arbeiten. Letztere betreffen insbesondere die Verwendung von Laserscanning-Simulationen (Winiwarter et al., 2022) zur Untersuchung des Detailgrads von luftgestützten 3D-Geodaten in Abhängigkeit der Stadtgeometrie und Aufnahmeparameter. Im Rahmen des Workshops fand außerdem eine Exkursion statt, die im nachfolgenden Abschnitt dargelegt wird.

2.1.3 Austauschtreffen mit Akteur*innen in Taiwan

Während des Aufenthalts in Taiwan fanden Treffen mit verschiedenen Akteur*innen statt mit besonderem Fokus auf das Projektthema des Einsatzes erneuerbarer Energien im Kontext von Smart Cities.

Solarenergie im Konzept der Mehrfachnutzung am Beispiel von Fischfarmen

Hinsichtlich der Mehrfachnutzung von Flächen, die insbesondere im städtischen Raum eine wichtige Möglichkeit der Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen darstellt, wurden anknüpfend an den ER3DS-Workshop (Abschnitt 2.1.2) zwei Fischfarmen besucht, von denen eine mit Solarmodulen über der Wasserfläche ausgestattet ist (Abb. 3a). Photovoltaikanlagen auf der Wasserfläche stellen eine Mehrfachnutzung der Fläche dar, die somit eine Energiegewinnung ohne zusätzlichen Flächenverbrauch ermöglichen. Die Energiegewinnung durch Photovoltaik wird hier von den Landbesitzer*innen durchgeführt, die die gewonnene Elektrizität in das staatliche Energienetz einspeisen. Von den Fischern selbst wird das Betreiben von Photovoltaikanlagen auf den Wasserflächen kritisch gesehen, da dies mit Einschränkungen ihrer Arbeit einhergeht: Die Solarmodule lassen sich nicht entfernen, sodass der Fischfang/-entnahme umständlicher ist. Zudem bestehen Bedenken, dass die Mittel zur Reinigung der Solarzellen Giftstoffe für den Fisch enthalten können, jedoch gibt es hierzu noch keine Untersuchung. Eine andere Fischfarm setzt Solarenergie bislang nur ein, um Turbinen zum Sauerstoffaustausch im Wasser zu betreiben (Abb. 3b), wozu ein Solarmodul am Rande der Wasserfläche aufgebaut ist. Auch hier könnte in Zukunft eine Mehrfachnutzung durch weitere Solarmodule auf der Wasserfläche eingeführt werden, um die Energiegewinnung auszuweiten.

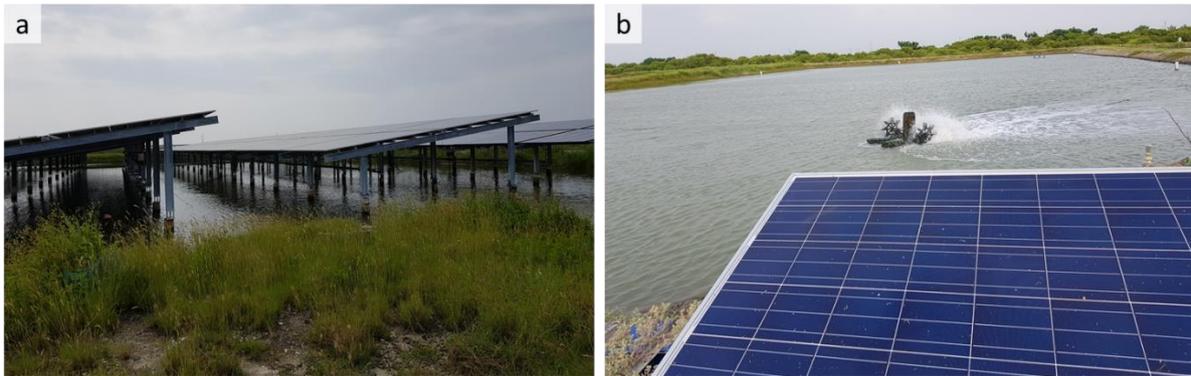


Abbildung 3: Fischfarmen in Taiwan (a) mit und (b) ohne Solarmodulen über der Wasserfläche zur Mehrfachnutzung des Gebiets. Fotos: B. Höfle (17.09.2019).

Austauschtreffen mit den Stadtverwaltungen von Taichung und Kaohsiung

Zum weiteren Austausch über fachliche und methodische Aspekte der Nutzung von 3D-Modellierung für die Planung und gezielten Einsatz erneuerbarer Energien im städtischen Raum fanden Treffen mit den Stadtverwaltungen von Taichung (18.09.2019) und Kaohsiung (19.09.2019; Abb. 4) statt. In Taichung wurde im Anschluss ein Solarkraftwerk und eine Abwasseraufbereitungsanlage besucht. Die Solaranlage (Module) ist in circa 12 m Höhe erbaut, sodass die Fläche darunter für Parkplätze und Vegetation, inklusive Bäume, genutzt werden kann (Abb. 5).



Abbildung 4: Eröffnung des Austauschtreffens mit der Stadtverwaltung von Kaohsiung im Rahmen des ER3DS Projekts. Foto: V. Zahs (19.09.2019).



Abbildung 5: Solaranlage in erhöhter Konstruktion zur Mehrfachnutzung der Fläche. Unter der Anlage sind Parkplätze sowie Grünfläche angelegt. Foto: V. Zahs (18.09.2019).

Die Stadt Kaohsiung präsentierte in Begehungen drei Beispiele von Gebäudeinfrastruktur, die dem Konzept des *KAOHAUS* Programms folgend errichtet wurden. Es handelt sich dabei um Gebäude mit integrierter Begrünung, die dazu dienen soll den thermischen Komfort und Hitzestress im Stadtinneren zu mindern (s. Abschnitt 2.2). Bei den besichtigten Gebäuden handelte es sich um ein Apartment-Hochhaus mit begrünten Balkonen, auf denen jeweils ein kleiner Baum gepflanzt wurde (Abb. 6a). Der Bau größerer Balkone wurde erst vergleichsweise kürzlich von der Stadt erlaubt, unter der Bedingung, dass Solaranlagen oder Begrünung integriert werden. Des Weiteren wurde die Dachbegrünung eines Schulgebäudes besichtigt (Abb. 6b). Diese hat den Zweck das Gebäude vor Erhitzung zu schützen und auch das lokale Stadtklima positiv zu beeinflussen. Eine solche Begrünung beinhaltet weiters einen Bildungsaspekt, da die Schüler*innen den Dachgarten pflegen und bebauen. Als dritte Komponente einer grünen Smart City wurden Einzelhäuser präsentiert, die aber – vergleichbar zum Apartment-Hochhaus – nicht maßgeblich zur Energieeinsparung beitragen, da sich nur wenige Solarmodule auf dem Dach befinden und die begrünte Fläche auf dem Balkon recht klein ist.

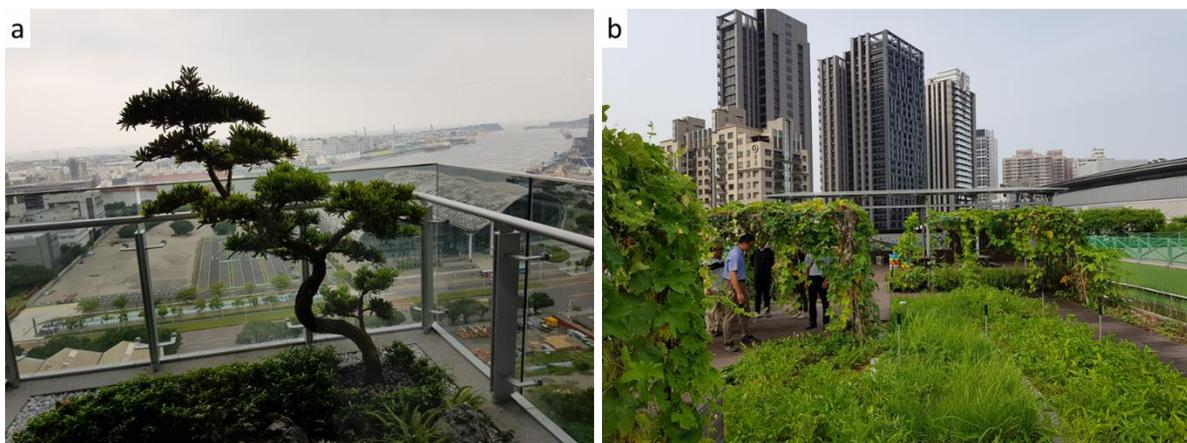


Abbildung 6: „Grüne Gebäude“ im Kaohsiung. (a) Blick vom bepflanzten Balkon eines Apartment-Hochhauses aus dem *KAOHAUS* Programm. (b) Dachgarten auf einem Schulgebäude. Fotos: B. Höfle (19.09.2019).

2.2 Nutzbarkeit öffentlicher Plätze angesichts steigender Sommerhitze

Die folgenden Abschnitte fassen die Ergebnisse der Projektaktivitäten zum Thema des städtischen Mikroklimas und thermischen Komforts zusammen. Es handelt sich um eine erste vergleichende Studie zwischen Taiwan und Deutschland und die Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für zukünftige Entwicklungen und Forschungsvorhaben, in denen das Wissen einer Region, bspw. weiter fortgeschrittener Hitzeanpassung in Taiwan, integriert werden kann.

2.2.1 Vergleichende Studie zum thermischen Komfort an öffentlichen Plätzen in Tainan und Heidelberg

Zur Beurteilung des thermischen Komforts in Zusammenhang mit mikroklimatischen Bedingungen wurde eine vergleichende Feldstudie in Tainan und Heidelberg durchgeführt. Im Rahmen der Studie wurde die Physiologisch Äquivalente Temperatur (Physiological Equivalent Temperature; PET) als Index zur Berechnung des thermischen Komforts in verschiedenen Klimabedingungen verwendet (s. Matzarakis et al., 1999). Dieser berücksichtigt die Lufttemperatur, relative Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und die mittlere Strahlungstemperatur als meteorologische Variablen. Ergänzend wurde der thermische Komfort von Personen auf den Plätzen über Fragebogen erfasst, sowie individuelle Meinungen und Verbesserungsvorschläge zum Mikroklima erfragt. Die Messungen im Rahmen der Feldstudie im Sommer 2020 zeigen, dass beide Plätze, der Marktplatz in Heidelberg und Blueprint Park in Tainan, nach dem PET Index als thermisch nicht komfortable Orte gelten. Ebenso nach der Umfrage mindert Hitzestress den thermischen Komfort in beiden Städten. Als Maßnahmen zur Reduzierung der Hitzebeeinträchtigung wurden in Heidelberg überwiegend Pflanzen vorgeschlagen. In Tainan empfehlen die befragten Personen neben Pflanzen auch Schattenplätze, besseren Zugang zu Trinkwasser und Klimaanlage. Die Forschung wurde nach einem mehrmonatigen Forschungsaufenthalt einer deutschen Studentin in Tainan mit einer Bachelorarbeit erfolgreich abgeschlossen (Weise, 2020).

2.2.2 Methodik zur Entwicklung von Adaptionstrategien für öffentliche Plätze

Der Marktplatz in Heidelberg sowie ein weiterer Platz im neuen Heidelberger Stadtteil Bahnhofsstadt, die Schwetzingen Terrasse, waren Fallbeispiel einer umfassenderen Pilotstudie im Rahmen der Forschung von Foshag et al. (2020). Hier wurden bereits im Sommer 2018 meteorologische Daten der beiden Plätze erfasst, darunter Temperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit. Um zu untersuchen, wie Maßnahmen der Beschattung, beispielsweise durch Bäume, das Mikroklima positiv beeinflussen können, wurde die Sonneneinstrahlung auf den Plätzen modelliert. Auf Basis von 3D-Stadtmodellen konnte dies mit der Forschungssoftware VOSTOK (Bechtold & Höfle, 2020) in verschiedenen Szenarien für die Plätze simuliert werden. Für die komplexe Geometrie der Stadtszene wurde das Solarpotenzial somit in 3D berechnet. Für den derzeitigen Zustand des Platzes, also im Ist-Zustand, wurde berechnet wieviel Solareinstrahlung jeder Ort in der Szene unter Annahme eines unbedeckten Himmels erfährt, in diesem Fall für die Periode Juni bis August 2018. Für die Untersuchung eines potentiellen zukünftigen Zustands wurden der gleiche 3D-Szene ausgewachsene Bäume und künstliche Beschattungsmaßnahmen virtuell hinzugefügt. So ergibt sich für die Schwetzingen Terrasse, dass die hohe Hitzebeeinträchtigung im Ist-Zustand durch Anpassungsmaßnahmen, wie zum Beispiel Baumbepflanzung, maßgeblich reduziert werden kann (Abb. 7).

Modelliertes Solarpotenzial für einen öffentlichen Platz in Heidelberg

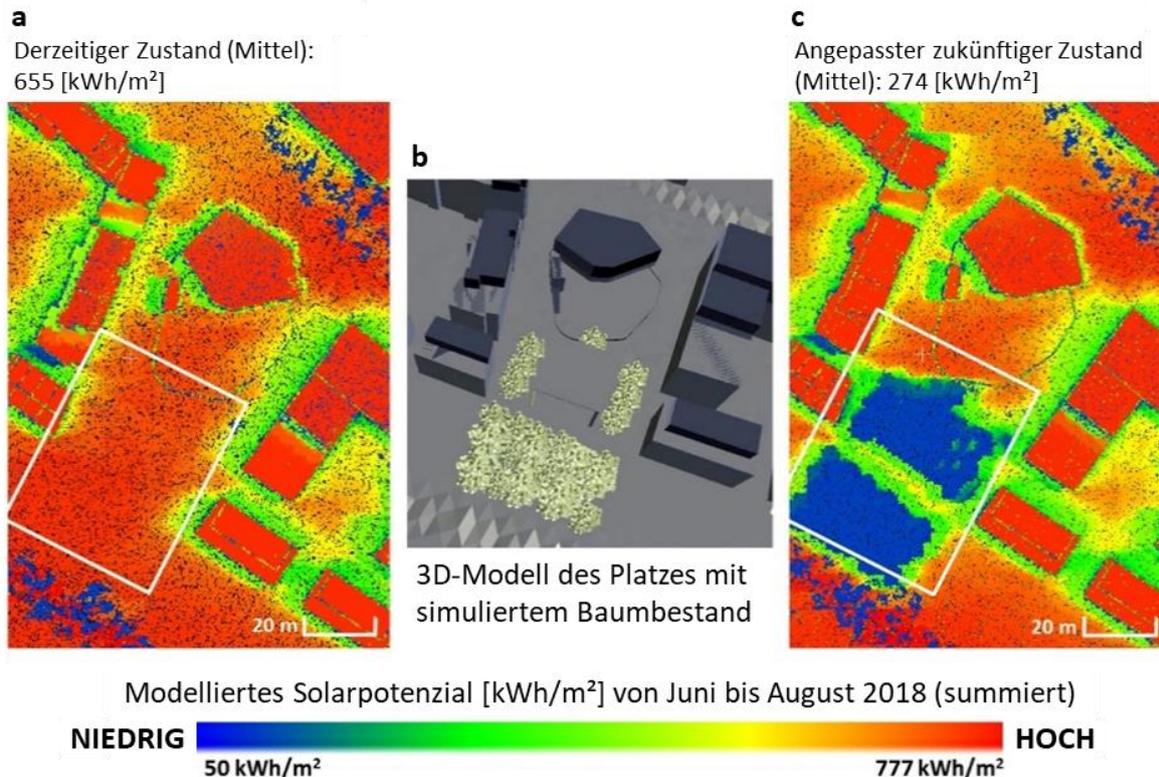


Abbildung 7: Modelliertes Solarpotenzial für einen öffentlichen Platz in Heidelberg (a) im aktuellen Zustand. (b) Modellierung eines angepassten Zustands mit ausgewachsenem Baumbestand zur Ableitung des (c) zukünftigen Solarpotenzials. Eigene Abbildung nach Foshag et al. (2020).

Insgesamt ergab die Studie, dass die Sonneneinwirkung durch simple Maßnahmen, wie Beschattung, rund 50 % reduziert werden kann. Dabei hat insbesondere Vegetation einen hitzemindernden Effekt. Jedoch ist entscheidend, dass die Vegetation vital ist, was unter den aktuellen Entwicklungen mit zunehmenden Dürreperioden und Hitzestress eine zusätzliche Herausforderung darstellt. Diese Thematik wird im abschließenden inhaltlichen Teil des Projekts aufgegriffen (Abschnitt 2.3). Die Ergebnisse der hier dargelegten Forschung sind in der Zeitschriftenpublikation von Foshag et al. (2020) veröffentlicht und erzielten darüber hinaus viel Aufmerksamkeit in den Medien (s. Auflistung der Öffentlichkeitsarbeit in Abschnitt 4).

2.3 Management von Stadtvegetation unter zunehmendem Hitzestress

Die Ergebnisse der Austauschaktivitäten und Studie zum Management von Stadtvegetation unter Berücksichtigung von zunehmendem Hitzestress sind nachfolgend dargestellt. Vergleichend zwischen der aktuellen Situation in Deutschland und Taiwan, wurden Treffen mit Akteur*innen mehrerer deutscher Städte durchgeführt (Abschnitt 2.3.1). Im Hinblick auf die erforderliche Entwicklung neuer Strategien des Vegetationsmanagements, insbesondere zur Bewässerung von Bäumen zum Erhalt der Vitalität, wurde außerdem eine Studie zum aktuellen Vegetationsmanagement und potenziell geplanten Anpassungen in taiwanesischen Städten durchgeführt (Abschnitt 2.3.2).

2.3.1 Austauschtreffen mit städtischen Abteilungen des Vegetationsmanagements in Deutschland

Um aktuelle Herausforderungen und die potenziellen Anforderungen an ein verbessertes Vegetationsmanagement mit Hilfe von 3D-Technologie herauszufinden, fanden Austauschtreffen mit Vertreter*innen der jeweils für das Vegetationsmanagement zuständigen Abteilungen der Städte Heidelberg und Neustadt an der Weinstraße statt. Insgesamt wurde hier bestätigt, dass die Relevanz für das Handlungsfeld des Managements von Stadtvegetation im Klimawandel dramatisch zunimmt. Besonders die Bewässerung von mehreren Zehntausend Bäumen (Bsp. Heidelberg) stellt eine enorme Herausforderung für die begrenzten Kapazitäten, insbesondere in der Verfügbarkeit von Personal und Bewässerungsfahrzeugen, dar. Die Bewässerung folgt einem festgelegten Plan auf Straßenlevel. Je nach den temporären Anforderungen, z.B. in Hitzeperioden, werden jüngere Bäume in der Bewässerung priorisiert. Der Zustand von Bäumen wird zweimal jährlich durch Expert*innen begutachtet und durch in-situ bestimmte Parameter aufgenommen, wobei der Fokus auf der Stabilität, nicht Vitalität, der Bäume liegt. Für die zukünftige Erarbeitung angepasster Strategien wird ein wesentlicher Faktor sein, dass sich Methoden bewähren und somit für die Städte langfristig umsetzbar sind.

2.3.2 Studie zum Umgang mit Stadtvegetation in Taiwan

Die Untersuchung der Situation in Taiwan wurde durch Recherche von Literatur und öffentlichen Ressourcen und Interviews mit wissenschaftlichen Partner*innen in Taiwan durchgeführt, sowie durch Kommunikation durch die taiwanesischen Projektpartner*innen mit verantwortlichen Personen der Stadtverwaltungen von Taipei, New Taipei, Taichung, Tainan und Kaohsiung. Ein zentraler Aspekt des Vegetationsmanagements, insbesondere Bewässerung von Stadtbäumen, in Taiwan ist, dass dieser Aufgabenbereich von den zuständigen Stadtabteilungen an Auftragnehmer*innen ausgelagert wird. Ein jeweiliges Unternehmen ist somit für mehrere Jahre vertraglich verpflichtet, ein gewisses Gebiet und Anzahl an Bäumen zu pflegen und bei Schaden für deren Ersatz zu Sorgen. Im Gegensatz zur Situation in Deutschland ist es grundsätzlich kaum möglich Bürgerinitiativen in die Baumpflege einzubeziehen, da es sich bei Stadtbäumen um öffentliches Eigentum handelt, das nur durch lizenzierte Personen verändert werden darf. Die Bewässerung von Bäumen in den großen Städten Taiwans findet durchweg durch Bewässerungsfahrzeuge statt, die in der Regel einem festgelegten Zeitplan auf Straßenlevel folgen. In trockenen Perioden findet oftmals keine Bewässerung statt, da das verfügbare Wasser für die Nutzung durch die Bevölkerung priorisiert wird. Die Nutzung digitaler Geotechnologien betrifft derzeit, ähnlich der Herangehensweise in deutschen Städten, die Erfassung des Baumzustands in einem Baumkataster der jeweiligen Stadt. Diese werden typischerweise durch in-situ Messung der Koordinaten und weiterer Parameter, wie zum Beispiel Baumhöhe und Durchmesser auf Brusthöhe, erfasst. Diese Aufgabe ließe sich zukünftig durch die Aufnahme und Auswertung von 3D-Geodaten weitgehend automatisieren und auf sehr große Gebiete skalieren, unter Minimierung von Personaleinsatz. Die Ergebnisse der Studie sind in einem technischen Bericht veröffentlicht (Anders et al., 2022).

Aus dem gewonnenen Wissen und Austausch mit Akteur*innen der verschiedenen Städte lässt sich zusammenfassen, dass der operationelle Einsatz von digitalen Geotechnologien zur Beobachtung des Baumzustands das gezielte Baummanagement in Städten maßgeblich un-

terstützen kann. Ein solcher Ansatz könnte einen wesentlichen Beitrag zu Anpassungsstrategien an den fortschreitenden Klimawandel und dessen Einflüsse auf das städtische Klima leisten und wird in weiteren Forschungsaktivitäten verfolgt.

2.4 Wissenstransfer und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses

Der Wissenstransfer zwischen Forscher*innen und Akteur*innen in Behörden und KMUs war ein wesentlicher Bestandteil aller zuvor dargelegten Projektaktivitäten und konnte erfolgreich umgesetzt werden. Wissenschaftlicher Nachwuchs war dabei eng eingebunden durch Teilnahme an den Workshops in Heidelberg und Taiwan. Hier fanden zum einen Vorträge und Lehrveranstaltungen statt, zum anderen präsentierten die Nachwuchsforscher*innen selbst ihre Arbeiten in Anknüpfung an das Projektthema und diskutierten ihre Forschung und Methodik vor einer internationalen Gruppe von Forschenden.

Eine wichtige Komponente des Wissenstransfers in der 3D-Methodik für geographische Analysen, mitunter die Modellierung des Solarpotenzials, stellte die Teilnahme einer Gruppe von Doktorand*innen der NCKU am Workshop „Spatial and Temporal Analysis of Geographic Phenomena“ (STAP) vom 01.04. bis 04.04.2019 in Heidelberg dar (s. <http://k1z.blog.uni-heidelberg.de/2019/04/05/stap19-workshop-and-compact-course-concluded/>).

Im Einzelaustausch fand ein mehrmonatiger Forschungsaufenthalt der Studentin Teresa Weise der Universität Heidelberg an der NCKU statt, die von Prof. Bernhard Höfle und Dr. Kathrin Foshag in ihrer Bachelorarbeit betreut wurde (Weise 2020; s. Abschnitt 2.2.1). Nachdem es die Pandemielage wieder zulässt, konnte nun nach dem Ende des Projektes im März 2022 der mehrmonatige Forschungsaufenthalt der Doktorandin Si-Yu Yu aus der Arbeitsgruppe von Prof. Lin an der Universität Heidelberg beginnen.

2.5 Fortführung der Austauschaktivitäten und wissenschaftliche Verwertung

Mit dem Forschungsbesuch der Doktorandin Si-Yu Yu wird die Austauschaktivität und Kooperation zum Projektthema unmittelbar fortgeführt. Unter Betreuung von Prof. Lin untersucht sie den thermischen Komfort bei sportlichen Aktivitäten im Stadtgebiet. Während ihres neunmonatigen Aufenthalts an der Uni Heidelberg wird sie unter Betreuung durch Prof. Höfle die Stadtstruktur in ihrer Methodik berücksichtigen können, indem beispielsweise 3D-Modelle und die Modellierung der Sonneneinstrahlung untersucht werden. Daraus ergibt sich weiterhin die Gelegenheit, eine deutsche Stadt als Fallbeispiel in dieser Forschungsarbeit zu integrieren und somit weitere vergleichende Erkenntnisse zu unterschiedlichen klimatischen Bedingungen und Stadtstrukturen zu gewinnen.

Eine weitere Anknüpfung findet mit der Forschungsgruppe von Prof. Wang statt, indem die Simulationssoftware HELIOS++ (Winiwarter et al., 2022) verwendet wird um die Aufnahme von Laserscanning-Daten in Stadtgebieten zu planen. Hierfür besitzt die NCKU einen neuen Sensortyp (LiDAR Sensor mit mehreren Kanälen), sodass eine Untersuchung der resultierenden Dateneigenschaften in der Simulation die Aufnahmeplanung maßgeblich unterstützen kann. Dazu findet derzeit eine Zusammenarbeit mit dem Kern-Entwicklungsteam von HELIOS++ in Heidelberg statt.

Zur Thematik des Stadtbaum-Managements werden die Erkenntnisse des Austauschs und der Studie in Deutschland und Taiwan direkt an das Projekt anschließend verwendet um ein

Verbundforschungsprojekt zu entwickeln. Ziel ist es das Monitoring von Stadtvegetation zu verbessern, sodass beide Länder (und darüber hinaus) mit den Städten als Nutzer*innen von den Ergebnissen profitieren können.

3. Fortschritt seitens Dritter

Es sind uns keine relevanten Ergebnisse von dritter Seite bekannt.

4. Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Projektes wurden in folgenden Veröffentlichungen verwertet:

Fachartikel:

Foshag, K., Aeschbach, N., Höfle, B., Winkler, R., Siegmund, A. & Aeschbach, W. (2020): Viability of public spaces in cities under increasing heat: A transdisciplinary approach. *Sustainable Cities and Society*, 59, 102215. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102215.

Abschlussarbeit:

Teresa Weise (2020): The influence of microclimate on thermal comfort at public spaces in urban areas. A Comparison between Heidelberg and Tainan. Institute of Geography, Heidelberg University. URL: https://www.researchgate.net/publication/360236875_The_influence_of_microclimate_on_thermal_comfort_at_public_spaces_in_urban_areas_A_Comparison_between_Heidelberg_and_Tainan (2022-05-06).

Technischer Bericht:

Anders, K., Weise, T., Aeschbach, N. & Höfle, B. (2022): Strategies of Managing Urban Tree Vegetation: A Study of Cities in Taiwan. Technical Report, pp. 30. DOI: 10.11588/heidok.00031780.

Source Code:

Bechtold, S. & Höfle, B. (2020): VOSTOK - The Voxel Octree Solar Toolkit. *heiDATA*, V1. DOI: 10.11588/data/QNA02B.

Öffentlichkeitsarbeit:

Das Projekt wird auf einer eigenen **Webseite** im Webauftritt der Universität Heidelberg vorgestellt und Publikationen sowie weitere Öffentlichkeitsarbeit verlinkt: www.uni-heidelberg.de/er3ds

Projektbezogene Neuigkeiten wurden laufend auf dem **Blog** der Abteilung Geoinformatik der Universität Heidelberg veröffentlicht: <http://k1z.blog.uni-heidelberg.de/tag/ER3DS/>

Zum Themengebiet des Projekts wurde eine **Pressemitteilung der Universität Heidelberg** über die Arbeit von Kathrin Foshag et al. (2020) veröffentlicht (<https://www.uni-heidelberg.de/de/newsroom/kein-platz-fuer-den-klimawandel>). Des Weiteren wurde das Thema rund um das Projektteam in Heidelberg in einem **Fernsehbeitrag** und mehreren **Radiobeiträgen** (z.B. <https://www.deutschlandfunkkultur.de/hitzewelle-das-gescheiterte-modell-heidelberg-bahnstadt-100.html>) aufgegriffen.

In Taiwan wurde die deutsch-taiwanische Kooperation des Projekts in zwei **Pressemitteilungen** in die Öffentlichkeit getragen, eine Mitteilung der Stadt (<https://www.taichung.gov.tw/1367483/post>) und eine der National Cheng Kung University (<https://news-secr.ncku.edu.tw/p/404-1037-197923.php>).

5. Literatur

- Anders, K., Weise, T., Aeschbach, N. & Höfle, B. (2022): Strategies of Managing Urban Tree Vegetation: A Study of Cities in Taiwan. Technical Report, pp. 30. DOI: 10.11588/heidok.00031780.
- Bechtold, S. & Höfle, B. (2020): VOSTOK - The Voxel Octree Solar Toolkit. *heiDATA*, V1. DOI: 10.11588/data/QNA02B.
- Foshag, K., Aeschbach, N., Höfle, B., Winkler, R., Siegmund, A. & Aeschbach, W. (2020): Viability of public spaces in cities under increasing heat: A transdisciplinary approach. *Sustainable Cities and Society*, 59, 102215. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102215.
- Gillner, S., Vogt, J., Tharang, A., Dettmann, S., Roloff, A. (2015): Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning*, 143, 33-42. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.06.005.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
- Jochem, A., Höfle, B., Rutzinger, M. & Pfeifer, N. (2009): Automatic roof plane detection and analysis in airborne LIDAR point clouds for solar potential assessment. *Sensors*, 9 (7), 5241-5262. DOI: 10.3390/s90705241.
- Kántor, N., Chen, L., Gál, C. V. (2018): Human-biometeorological significance of shading in urban public spaces—Summertime measurements in Pécs, Hungary. *Landscape and Urban Planning*, 170, 241-255. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.09.030.
- Kuttler, W. (2008): The Urban Climate - Basic and Applied Aspects. In: Marzluff, J.M., Shulenberg, E., Endlicher, W., Alberti, M., Bradley, G., Ryan, C., Simon, U., ZumBrunnen, C. (Eds.): *Urban Ecology - An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature*. New York, USA: Springer Science & Business Media, LLC, 233-248. DOI: 10.1007/978-0-387-73412-5_13.
- Lai, D., Liu, W., Gan, T., Liu, K., Chen, Q. (2019): A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment*, 661, 337-353. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.062.
- Lin, T.-P., Lin, F.-Y., Wu, P.-R., Hämmerle, M., Höfle, B., Bechtold, S., Hwang, R.-L. & Chen, Y.-C. (2017): Multiscale analysis and reduction measures of urban carbon dioxide budget based on building energy consumption. *Energy and Buildings*, 153, 356-367. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.084.

- Matzarakis, A., Mayer, H. & Iziomon, M. (1999): Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43, 76–84. DOI: 10.1007/s004840050119.
- Matzarakis, A. & Endler, C. (2010): Climate change and thermal bioclimate in cities: Impacts and options for adaptation in Freiburg, Germany. *International Journal of Biometeorology*, 54 (4), 479-483. DOI: 10.1007/s00484-009-0296-2.
- Mohajerani, A., Bakaric, J., Jeffrey-Bailey, T. (2017): The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522-538. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.03.095.
- Müller-Seitz, G., Seiter, M. & Wenz, P. (2016). Was ist eine Smart City?. Springer Fachmedien Wiesbaden, 58. DOI: 10.1007/978-3-658-12642-1.
- Nikolopoulou, M. & Lykoudis, S. (2006). Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries. *Building and environment*, 41(11), 1455-1470. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.05.031.
- Nikolopoulou, M. & Steemers, K. (2003): Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Building*, 35, 95-101. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00084-1.
- Quesnel, K.J., Ajami, N., Marx, A. (2019): Shifting landscapes: decoupled urban irrigation and greenness patterns during severe drought. *Environmental Research Letters*, 14(6). DOI: 10.1088/1748-9326/ab20d4.
- Revi, A., D.E. Satterthwaite, F. Aragón-Durand, J. Corfee-Morlot, R.B.R. Kiunsi, M. Pelling, D.C. Roberts & W. Solecki, 2014: Urban areas. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 535-612.
- Seto, K. C. Dhakal, S., Bigio, A., Blanco, H., Delgado, G.C., Dewar, D., Huang, L., Inaba, A., Kansal, A., Lwasa, S., McMahon, J.E., Müller, D.B., Murakami, J., Nagendra, H., Ramaswami, A. (2014): Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel T., Minx, J.C. (Eds.): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 923-1000.
- Weise, T. (2020): The influence of microclimate on thermal comfort at public spaces in urban areas. A Comparison between Heidelberg and Tainan. Bachelor Thesis, Heidelberg University. URL: https://www.researchgate.net/publication/360236875_The_influence_of_microclimate_on_thermal_comfort_at_public_spaces_in_urban_areas_A_Comparison_between_Heidelberg_and_Tainan (2022-05-06).

Winiwarter, L., Esmorís Pena, A., Weiser, H., Anders, K., Martínez Sanchez, J., Searle, M. & Höfle, B. (2022): Virtual laser scanning with HELIOS++: A novel take on ray tracing-based simulation of topographic full-waveform 3D laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 269. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112772.