

Entwicklung einer stationären Messanlage zur Quantifizierung und Visualisierung des Kühleffekts urbaner Vegetation

Sebastian Rath¹, Anna Zeiser¹, Peter Strauss¹, Thomas Weninger¹

¹ *Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Bundesamt für Wasserwirtschaft,
Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen, Österreich*

Kurzfassung: Die Versiegelung in Siedlungsgebieten reduziert die natürliche Evapotranspiration und verstärkt die städtische Hitzebelastung. Eine ausreichend mit Wasser versorgte, vitale Stadtvegetation kann diesem Effekt durch Beschattung und Verdunstung entgegenwirken. Die Kühlleistung durch Transpiration wird an zwei Einzelbäumen und einer Hecke an drei Standorten in Österreich und Tschechien untersucht. Eine stationäre Monitoringanlage mit Thermalkamera und Lufttemperatursensor soll automatisiert Messdaten zur Berechnung des latenten Wärmestroms liefern. Aus diesen Daten werden aktuelle Verdunstungswerte berechnet und visuell auf Monitoren vor Ort aufbereitet. An zwei Standorten erfolgt ein Vergleich mit Saftstrommessungen. Ziel ist es, ein einfach reproduzierbares Messsystem zu entwickeln, das neben der Bereitstellung plausibler Verdunstungswerte besonders zur Bewusstseinsbildung der Bevölkerung beiträgt. Die Ergebnisse sollen die Bedeutung grüner Infrastrukturen für urbane Kühlung für die Bevölkerung verständlich veranschaulichen. Im ersten Messjahr (ab Spätsommer 2025) erfolgt die Erprobung der Methodik, im zweiten Jahr die Erhebung belastbarer Daten.

Key-Words: grüne Infrastruktur, urbane Hitzeinsel, Thermografie, latente Wärme, Verdunstung, Kühleffekt

1 Einleitung

Die Versiegelung und Bebauung natürlicher Flächen verändert die vorherrschende Wasser- und Energiebilanz. Versiegelte Oberflächen verstärken den sensiblen Wärmefluss und den Bodenwärmestrom, was zu einer Wärmeübertragung zwischen Oberfläche und Atmosphäre führt. Gleichzeitig wird die Versickerung von Niederschlagswasser verhindert, womit der kühlende Effekt der Evapotranspiration großteils entfällt (Back & Kleidorfer, 2023).

Das Vorhandensein von Wasser an der Oberfläche und im Boden bildet die Voraussetzung für Evaporation und Transpiration und somit für die Umwandlung von eingehender Strahlung in latente Wärme. Im Gegensatz zum sensiblen Wärmestrom erhöht der latente Wärmestrom die Umgebungstemperatur nicht direkt, da die aufgenommene Energie für den Phasenübergang von Wasser in Wasserdampf verwendet wird (Schwingshackl et al., 2017). Urbane Vegetation bzw. grüne Infrastrukturelemente können die Hitzebelastung in Städten durch Beschattung und Evapotranspiration reduzieren. Eine wesentliche Voraussetzung ist die nachhaltige und ausreichende Wasserversorgung der Vegetation (Back & Kleidorfer, 2023). Maßnahmen der dezentralen Siedlungswasserbewirtschaftung, wie blau-grüne Infrastrukturen, beispielsweise Baumrigolen, können den Anteil des für urbane Vegetation verfügbaren Niederschlagswassers erhöhen (Richter et al., 2024). Um die Akzeptanz und Umsetzung blau-grüner Infrastrukturmaßnahmen zu fördern, ist eine klare und verständliche Kommunikation ihrer Vorteile, insbesondere der kühlenden Wirkung essenziell. Dabei sollte gezielt Bewusstsein dafür geschaffen werden, wie transpirierende Pflanzen in die städtische Energiebilanz eingreifen und welche Einflussfaktoren diesen Prozess bestimmen (Ryplova & Pokorny, 2020).

2 Ziele

Im Rahmen des Interreg-Projekts „Plants4Cooling“ wird die Verdunstungsleistung und damit ein Mechanismus des Kühleffekts einzelner Vegetationselemente mithilfe einer stationären Messanlage quantifiziert und für die Öffentlichkeit visuell auf Bildschirmen veranschaulicht. Das Hauptziel besteht darin, ein Tool bereitzustellen, das der Bevölkerung die Bedeutung grüner Infrastruktur für den Wärmehaushalt im Siedlungsraum verständlich aufzeigt und gleichzeitig automatisiert wissenschaftlich fundierte Daten aufnimmt. Das Messsystem soll möglichst so konzipiert sein, dass es von Gemeinden reproduziert und zur Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung eingesetzt werden kann.

3 Theoretische Grundlagen

Die Oberflächenenergiebilanz ergibt sich aus dem latenten Wärmestrom, dem sensiblen Wärmestrom sowie dem Bodenwärmestrom, deren Summe der Nettogesamtstrahlung entsprechen. Somit ergibt sich als Basis für die Abschätzung des latenten Wärmestroms und damit der Verdunstungsleistung folgende Formel:

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

LE...latenter Wärmestrom in W/m^2

R_n ...Nettostrahlung in W/m^2

G...Bodenwärmestrom in W/m^2

H...sensibler Wärmestrom in W/m^2 (Zhao et al., 2022)

Darauf aufbauend entwickelte Qiu (1996) das 3T-Modell, welches der Abschätzung der Transpirationsrate von Pflanzen, der Evaporationsrate unbewachsener Böden sowie der Kombination beider Prozesse dient. Die Methode erfordert eine geringe Anzahl an Messparametern, darunter drei Temperaturmessungen, die namensgebend für das Modell sind sowie zwei Messungen der Nettostrahlung. Zentral ist der Einsatz eines nicht transpirierenden Referenzblatts, dessen Farbe, Form und Oberflächenstruktur echten Blättern möglichst ähnlich ist. Zur näherungsweisen Bestimmung des latenten Wärmestroms werden die Oberflächentemperaturen von transpirierenden Blättern und des Referenzblatts erfasst sowie die jeweilige Nettostrahlung unmittelbar darüber gemessen. Auf dieser Grundlage lässt sich rechnerisch abschätzen, welcher Anteil der verfügbaren Energie in Form von latenter Wärme für die Transpiration umgesetzt wird (Qiu et al., 2015). Bei ausreichendem Vegetationsbedeckungsgrad kann davon ausgegangen werden, dass die eingehende Strahlung von der Pflanzendecke abgefangen wird, sodass kaum Energie den Boden erreicht. Die Bodenverdunstung ist somit gering, der zu messende latente Wärmefluss entspricht damit weitgehend der Transpiration der zu untersuchenden Pflanze, und der Bodenwärmestrom kann vernachlässigt werden (Zhao et al., 2022). Die Berechnung des latenten Wärmestroms erfolgt somit nach folgender Formel:

$$LE_c = R_{n,c} - R_{n,cp} \frac{T_c - T_a}{T_{cp} - T_a} \quad (2)$$

LE_c ...latente Wärme durch Transpiration in W/m^2

$R_{n,c}$...Nettostrahlung der transpirierenden Blätter in W/m^2

$R_{n,cp}$...Nettostrahlung des Referenzblattes in W/m^2

T_c ...Oberflächentemperatur der transpirierenden Blätter in $^{\circ}C$

T_{cp} ...Oberflächentemperatur des Referenzblattes in $^{\circ}C$

T_a ...Lufttemperatur in $^{\circ}C$ (Qiu et al., 2020)

Zou et al. (2019) setzten das 3T-Modell ein, um die Transpirationsrate urbaner Hecken näherungsweise zu bestimmen. Qiu et al. (2020) entwickelten das Modell zum sogenannten 3D-3T-Modell weiter, um die Verdunstung größerer Einzelbäume näherungsweise zu erfassen. Dabei werden zu bestimmten Zeitpunkten im Tagesverlauf 10 manuelle Messungen der Oberflächentemperaturen und der Nettostrahlung aus verschiedenen Richtungen rund um den Baum getätigt. Die Nettostrahlung wird dabei händisch mit Net-Radiometern sowohl über der transpirierenden Baumkrone, als auch über dem Referenzblatt gemessen. Ersatzweise kann die Nettostrahlung nach Jensen et al. (1990) unter der Verwendung der Globalstrahlung sowie von Literaturwerten oder einmaligen Messwerten zu Albedo und Emissivität abgeschätzt werden.

Um die gemessene latente Wärme in Verdunstungswerte umzurechnen kann die Verdampfungsenthalpie λ herangezogen werden. Das ist jene Menge an Energie, die

benötigt wird um ein 1 kg Wasser zu verdunsten. Bei einer Wassertemperatur von 20 C° beträgt λ rund $2,45 \cdot 10^6$ J/kg. Wird diese Energiemenge je Quadratmeter zugeführt, kann 1 l Wasser je Quadratmeter verdunsten (Allen et al., 1998).

4 Material und Methoden

Die mehrkomponentige stationäre Messanlage soll an drei urbanen Standorten, zwei in Österreich und einer in Tschechien, die Verdunstungsraten von zwei Einzelbäumen und einer Hecke automatisiert messen. Die Messungen werden an sonnigen Tagen während der Vegetationsperiode durchgeführt. Im Messzeitraum soll halb- bis viertelstündlich über zumindest 2 Jahre gemessen werden.

4.1 Messtechnik und Datenaufnahme

Die Messanlage umfasst eine fest installierte Thermalkamera, einen Lufttemperatursensor sowie zugehörige Komponenten für Datenverarbeitung und -übertragung (Abb. 1). Die Thermalkamera wird in erhöhter Position mit Zugang zur Stromversorgung und Blickrichtung auf einen sonnenbeschienenen Teil der Baumkrone montiert. Je nach Standort variiert die Entfernung zwischen Kamera und Messobjekt (Baumkrone) zwischen 15 und 45 m.

Die Kamera ist in der Lage, automatisiert sowohl RGB- als auch Thermalbilder inklusive pixelgenauer Rohwerte aufzuzeichnen. Es werden innerhalb des Bildausschnitts mehrere Messpolygone definiert, die für die weitere Datenverarbeitung herangezogen werden. Das Hauptaugenmerk liegt auf der kontinuierlichen Erfassung der Oberflächentemperatur der sonnenexponierten Baumkrone sowie des Referenzblattes. Ergänzend werden je Standort weitere Polygone für versiegelte Flächen (z. B. Asphalt) sowie angrenzende Vegetationsflächen (z. B. Rasen) definiert.

Der Lufttemperatursensor wird in unmittelbarer Nähe des Messobjekts in einer Höhe von zwei Metern installiert. Zur Validierung der auf der 3T-Methode basierten Verdunstungsabschätzungen ist an zwei Standorten der ergänzende Einsatz eines Saftstromsensors vorgesehen. Dieser erlaubt als invasive Messmethode Rückschlüsse auf die Transpirationsleistung durch die Erfassung des Saftflusses im Stammquerschnitt. Standortbezogene Daten zur Globalstrahlung, als Grundlage für die näherungsweise Bestimmung der Nettostrahlung, werden von nahegelegenen externen Wetterstationen bezogen.

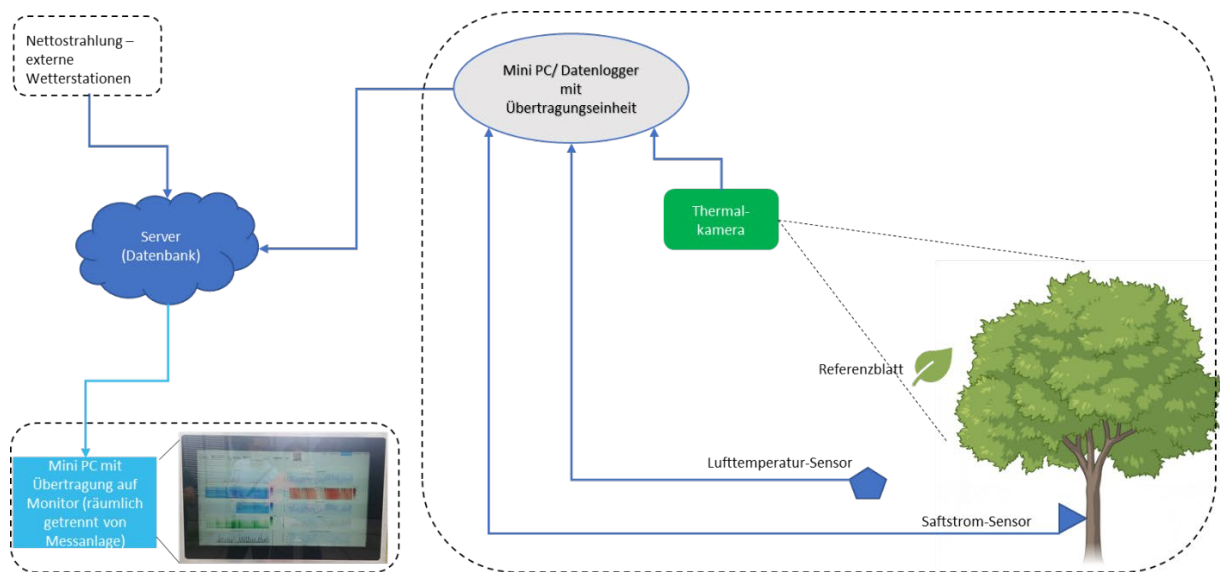


Abbildung 1: Grundkonzept zur Entwicklung einer stationären Anlage zur Messung des Kühleffekts urbaner Vegetation.

4.2 Messstandorte und -objekte

Die Messstandorte befinden sich in Jindřichův Hradec (Tschechien), Obersiebenbrunn und Wolkersdorf (beide Niederösterreich). Sie liegen im mitteleuropäischen Übergangsraum zwischen dem Böhmischem-Mährischen Hügelland und dem westlichen Rand des pannonischen Beckens. Sie sind durch ein gemäßigt kontinentales Klima mit warmen, teils heißen Sommern geprägt. Die Landschaften weisen überwiegend agrarische Nutzung auf, unterbrochen von kleinen Waldflächen und Siedlungsstrukturen mit ländlich-kleinstädtischem Charakter.

Der Messstandort in der südböhmischen Stadt Jindřichův Hradec liegt an einer innerstädtischen öffentlichen Straße. Das Messobjekt ist eine freistehende Linde mit einer Höhe von etwa 8 m, gepflanzt in einer rund 25 m² großen Baumscheibe, die mit Rindenmulch bedeckt ist. Der angrenzende Straßenraum ist durch Kleinsteinpflaster versiegelt. Die Baumumgebung ist städtebaulich geprägt: Nord- und ostseitig befinden sich mehrgeschossige Gebäude, während südwestlich der Stadtpark Husovy sady anschließt.

Am zweiten Standort in Obersiebenbrunn (Niederösterreich) befindet sich das Messobjekt, ein rund 10 m hoher Ahorn, auf einer Rasenfläche in einem Schulareal. Das Gelände weist eine Mischung aus Schulgebäuden, betonsteingepflasterten Wegen sowie parkähnlich gestalteten Grünflächen mit Einzelbäumen auf. Der Ahorn ist südwestlich und nordwestlich von gepflasterten Wegen begrenzt, nordöstlich und südöstlich schließen Rasenflächen mit weiterem Baumbestand an.

Der dritte Standort liegt im Wirtschaftspark Wolkersdorf (ecoplus), ebenfalls in Niederösterreich. Dort dient eine freiwachsende Hecke aus verschiedenen

Laubgehölzen mit einer mittleren Höhe von ca. 4 m als Messobjekt. Nordwestlich der Hecke befindet sich ein versiegeltes Firmengelände mit Asphaltflächen, südöstlich schließt eine Wiesenfläche an, gefolgt von einem weiteren Betriebsgebäude.

4.3 Datenverarbeitung und -darstellung

Die Lufttemperaturdaten, die Rohwerte der gemessenen Oberflächentemperaturen sowie die generierten Thermalbilder werden automatisiert auf einen Server übertragen. Die Messdaten, sowie die externen Daten zur Globalstrahlung fließen unter anderem in die Formel 2 ein und liefern numerische Ergebnisse zur latenten Wärme. Die Umrechnung in Verdunstungswerte erfolgt auf Basis der Verdampfungsenthalpie (siehe Kapitel 3). Für die Extrapolation der Verdunstungswerte auf den gesamten transpirierenden Kronenbereich wird die sonnenbeschienene Kronenfläche je nach Tageszeit geschätzt und in die Berechnung integriert.

Die Ergebnisse werden standortspezifisch über externe Indoor-Monitore automatisiert und visuell ansprechend dargestellt. Geplant ist die Erstellung von Diagrammen auf Grundlage der erhobenen Messdaten (z. B. Saftstrommessungen, Oberflächentemperaturen etc.) sowie die Darstellung aktueller Thermalbilder. Darüber hinaus sollen auf Basis des Thermalbildes und der daraus berechneten Verdunstungswerte neue Ergebnistraster generiert und durch eine aussagekräftige Farbgebung visualisiert werden.

5 Ausblick

Der Beginn der Messkampagne ist für den Spätsommer 2025 vorgesehen. Im ersten Messjahr liegt der Fokus auf der Erprobung und Optimierung der Methodik. Im zweiten Jahr sollen sowohl wissenschaftlich belastbare Daten generiert als auch das Ziel der Bewusstseinsbildung wirkungsvoll erreicht werden.

6 Förderinformation

Das Projekt „Plants4Cooling“ (ATCZ00093) wird von der Europäischen Union im Rahmen des Programms INTERREG VI-A Österreich-Tschechien 2023-2027 durch den EFRE kofinanziert. Die Projektlaufzeit ist Jänner 2024 bis Dezember 2026. Für die Inhalte dieser Veröffentlichung sind ausschließlich die publizierenden Organisationen verantwortlich.

7 Literatur

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. & Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and

- Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Back Y. & Kleidorfer M. (2023). Chancen und Herausforderungen bei der Gestaltung klimaresistenter dichter städtischer Gebiete mit Blaugrüner Infrastruktur. *Österr. Wasser- und Abfallw.* 75, 615–625 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s00506-023-00989-3>.
- Jensen M. E., Burman R. D. & Allen R. G. (1990). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. In *Manuals and reports on engineering practice* (No. 70, pp. 25–41). New York.
- Qiu G.Y. (1996). A new method for estimation of evapotranspiration (Ph.D. Dissertation). The United Graduate School of Agriculture Science, Tottori University, Japan.
- Qiu G.Y., Li C. & Yan C. (2015). Characteristics of soil evaporation, plant transpiration and water budget of Nitraria dune in the arid Northwest China. *Agric. For. Meteorol.* 203, 107–117.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.01.006>.
- Qiu G.Y., Yu X., Wen H. & Yan C. (2020). An advanced approach for measuring the transpiration rate of individual urban trees by the 3D three-temperature model and thermal infrared remote sensing. *Journal of Hydrology* 587 (2020) 125034. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125034>.
- Richter M., Heinemann K., Meiser N. & Dickhaut W. (2024). Trees in Sponge Cities-A Systematic Review of Trees as a Component of Blue-Green Infrastructure, Vegetation Engineering Principles, and Stormwater Management. *Water*, 16(5), 655. <https://doi.org/10.3390/w16050655>.
- Ryplova R. & Pokorný J. (2020). Saving Water for the Future Via Increasing Plant Literacy of Pupils. *European Journal of Sustainable Development*, 9(3), 313. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n3p313>.
- Schwingshackl C., Hirschi M. & Seneviratne S. I. (2017). Quantifying Spatiotemporal Variations of Soil Moisture Control on Surface Energy Balance and Near-Surface Air Temperature. *J. Climate*, 30, 7105–7124, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0727.1>.
- Zhao W., Dong X., Wu Z., Wei C., Li L., Yu D., Fan X. & Ma Y. (2022). Using infrared thermal imaging technology to estimate the transpiration rate of citrus trees and evaluate plant water status. *Journal of Hydrology*, 615 (Part A), 128671. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128671>.
- Zou Z., Yang Y. & Qiu G.Y. (2019). Quantifying the Evapotranspiration Rate and Its Cooling Effects of Urban Hedges Based on Three-Temperature Model and Infrared Remote Sensing. *Remote Sens.* 2019, 11(2), 202. <https://doi.org/10.3390/rs11020202>.

Korrespondenz an:

Sebastian Rath
Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen, Österreich
Telefon: +43 680 2310160
E-Mail: sebastian.rath@baw.at

Interreg
Österreich – Tschechien



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Plants4cooling