Der Photovoltaik-Wärmeinsel-Effekt: große Solarparks lassen die lokale Temperatur steigen

geschrieben von Chris Frey | 30. März 2021

Frühere Arbeiten zum PVHI waren meist theoretischer Natur oder basierten auf Modell-Simulationen. Außerdem waren frühere empirische Arbeiten auf ein einziges Biom beschränkt. Da es immer noch große Unsicherheiten in Bezug auf das Potenzial für einen PHVI-Effekt gibt, haben wir den PVHI empirisch mit Experimenten untersucht, die sich über drei Biome erstreckten. Wir fanden heraus, dass die Temperaturen über einer PV-Anlage nachts regelmäßig 3-4 °C höher lagen als in der freien Natur, was in direktem Gegensatz zu anderen Studien steht, die auf Modellen basieren, legten diese doch nahe, dass PV-Anlagen die Umgebungstemperatur senken sollten. Die Ableitung der zugrunde liegenden Ursache und des Ausmaßes des PVHI-Effekts sowie die Identifizierung von Abschwächungs-Strategien sind der Schlüssel zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in Bezug auf die Entwicklung von PV-Anlagen, insbesondere in semiariden Landschaften, die am ehesten für großflächige PV-Anlagen in Frage kommen.
Die Stromerzeugung aus Photovoltaik (PV)-Großanlagen hat in den letzten Jahrzehnten exponentiell zugenommen[1-3]. Diese Zunahme der Portfolios an erneuerbaren Energien und PV-Kraftwerken zeigt, dass die Akzeptanz und Kosteneffizienz dieser Technologie gestiegen ist[4,5]. Parallel zu diesem Anstieg der Installationen hat auch die Bewertung der Auswirkungen von PV-Anlagen im Nutzungs-Maßstab[4,6-8] zugenommen, einschließlich der Auswirkungen auf die Wirksamkeit von PV zum Ausgleich des Energiebedarfs[9,10].

Ein zunehmendes, noch nicht ausreichend untersuchtes Problem ist die Frage, ob PV-Installationen einen „Wärmeinseleffekt“ (PVHI) verursachen, der die umliegenden Gebiete erwärmt und dadurch möglicherweise den Lebensraum von Wildtieren, die Funktion von Ökosystemen in der freien Natur sowie die menschliche Gesundheit und sogar den Wert von Häusern in Wohngebieten beeinflusst[11]. Wie beim Urban Heat Island (UHI)-Effekt verursachen große PV-Kraftwerke eine Landschaftsveränderung, die die Albedo reduziert, so dass die veränderte Landschaft dunkler und damit weniger reflektierend ist. Die Verringerung der terrestrischen Albedo von ~20% in natürlichen Wüsten[12] auf ~5% über PV-Panels[13] verändert die

Energiebilanz der Absorption, Speicherung und Abgabe von kurz- und langwelliger Strahlung[14,15]. Mehrere Unterschiede zwischen den UHI- und potenziellen PVHI-Effekten erschweren jedoch einen einfachen Vergleich und führen zu konkurrierenden Hypothesen darüber, ob großflächige PV-Installationen einen Wärmeinseleffekt erzeugen oder nicht. Diese beinhalten: (i) PV-Installationen beschatten einen Teil des Bodens und könnten daher die Wärmeabsorption in den Oberflächenböden reduzieren16, (ii) PV-Paneele sind dünn und haben eine geringe Wärmekapazität pro Flächeneinheit, aber PV-Module strahlen sowohl nach oben als auch nach unten Wärmestrahlung ab, und dies ist besonders während des Tages von Bedeutung, wenn PV-Module oft 20 °C wärmer sind als die Umgebungstemperatur, (iii) die Vegetation wird in der Regel vor [der Installation von] PV-Kraftwerken entfernt, was die Menge an Kühlung durch Transpiration verringert[14], (iv) elektrischer Strom entzieht PV-Kraftwerken Energie und (v) PV-Paneele reflektieren und absorbieren aufsteigende langwellige Strahlung und können somit verhindern, dass der Boden so stark abkühlt, wie es unter einem dunklen Himmel in der Nacht der Fall wäre.

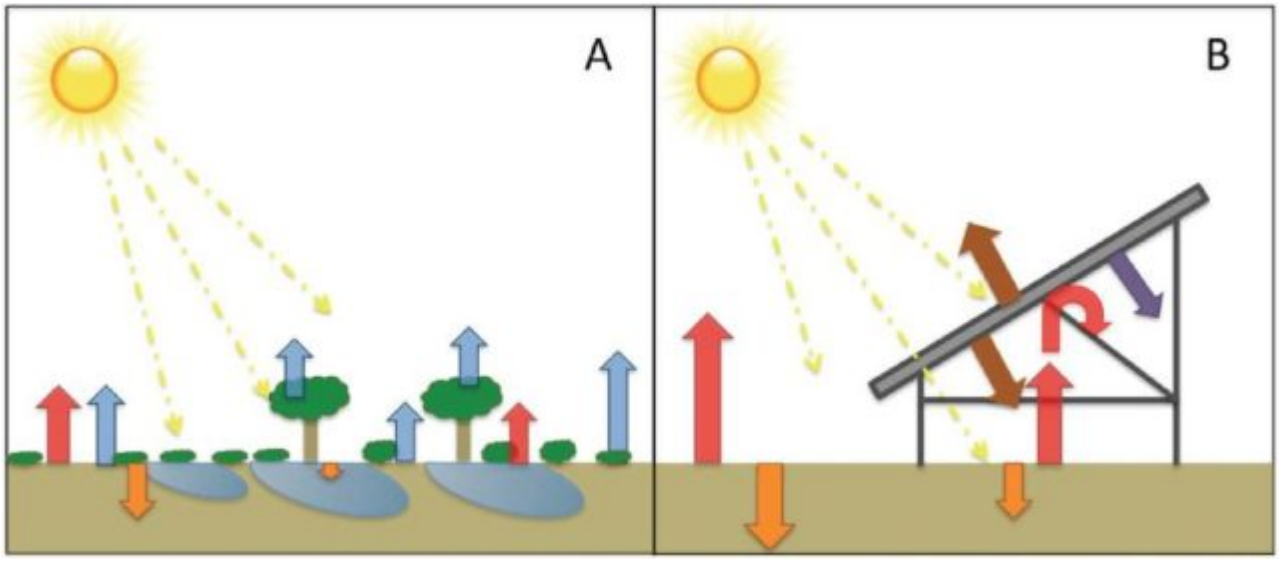

Abbildung 1: **Illustration des mittäglichen Energieaustauschs**. Unter der Annahme, dass die eintreffende Energie von der Sonne gleich hoch ist, wird der Übergang von (A) einem bewachsenen Ökosystem zu (B) einer Photovoltaik (PV)-Kraftwerksanlage die Energieflussdynamik des Gebiets erheblich verändern. In natürlichen Ökosystemen reduziert die Vegetation die Wärmeaufnahme und -speicherung im Boden (orangefarbene Pfeile), und infiltriertes Wasser und die Vegetation geben wärmeabgebende latente Energieströme beim Übergang von Wasser zu Wasserdampf in die Atmosphäre durch Evapotranspiration ab (blaue Pfeile). Diese latenten Wärmeströme werden in typischen PV-Anlagen drastisch reduziert, was zu größeren fühlbaren Wärmeströmen führt (rote Pfeile). Die Energierückstrahlung von PV-Paneelen (brauner Pfeil) und die in Elektrizität umgewandelte Energie

(violetter Pfeil) sind ebenfalls dargestellt.

Öffentliche Bedenken über einen PVHI-Effekt haben in einigen Fällen zu Widerstand gegen die Entwicklung von Solaranlagen in großem Maßstab geführt. Einigen Schätzungen zufolge wurde fast die Hälfte der kürzlich vorgeschlagenen Energieprojekte aufgrund des lokalen Widerstands verzögert oder aufgegeben[11]. Es gibt jedoch einen bemerkenswerten Mangel an Daten darüber, ob der PVHI-Effekt real ist oder nur ein Problem im Zusammenhang mit der Wahrnehmung von Umweltveränderungen durch die Anlagen, die zu einem „Nicht in meinem Hinterhof“-Denken *(Not In My BackYard;* NIMBY) führen. Einige Modelle deuten darauf hin, dass PV-Anlagen tatsächlich einen kühlenden Effekt auf die lokale Umgebung haben können, abhängig von der Effizienz und der Platzierung der PV-Paneele[17,18]. Aber diese Studien sind in ihrer Anwendbarkeit bei der Bewertung von PV-Großanlagen begrenzt, da sie Änderungen der Albedo und des Energieaustauschs in einer städtischen Umgebung (und nicht in einem natürlichen Ökosystem) oder an europäischen Standorten berücksichtigen, die nicht repräsentativ für die semiaride Energiedynamik sind, in der PV-Großanlagen konzentriert sind[10,19]. Die meisten bisherigen Forschungen beruhen also auf ungeprüften Theorien und numerischer Modellierung. Daher muss das Potenzial für einen PHVI-Effekt mit empirischen Daten untersucht werden, die durch strenge experimentelle Bedingungen gewonnen werden.

Die Bedeutung eines PVHI-Effekts hängt von der Energiebilanz ab. Eingehende Sonnenenergie wird normalerweise entweder zurück in die Atmosphäre reflektiert oder absorbiert, gespeichert und später in Form von latenter oder fühlbarer Wärme wieder abgestrahlt (Abb. 1)[20,21]. In natürlichen Ökosystemen reduziert die Vegetation den Wärmegewinn und die Wärmespeicherung im Boden, indem sie eine Oberflächenbeschattung erzeugt, wobei der Grad der Beschattung je nach Pflanzenart unterschiedlich ist[22]. Die von der Vegetation und der Bodenoberfläche absorbierte Energie kann als latente Wärme beim Übergang von flüssigem Wasser zu Wasserdampf durch Evapotranspiration – dem kombinierten Wasserverlust aus Böden (Verdunstung) und Vegetation (Transpiration) – an die Atmosphäre abgegeben werden. Dieser Wärme abgebende latente Energieaustausch ist in einer typischen PV-Anlage drastisch reduziert (Abb. 1 Übergang von A nach B), was möglicherweise zu einer größeren Wärmeabsorption durch Böden in PV-Anlagen führt. Diese erhöhte Absorption wiederum könnte die Bodentemperaturen erhöhen und zu einem größeren fühlbaren Wärmeabfluss aus dem Boden in Form von Strahlung und Konvektion führen. Darüber hinaus absorbieren die Oberflächen von PV-Modulen aufgrund einer geringeren Albedo mehr

Sonneneinstrahlung[13,23,24]. PV-Paneele strahlen den größten Teil dieser Energie als langwellige fühlbare Wärme wieder ab und wandeln einen geringeren Teil (~20 %) dieser Energie in nutzbare Elektrizität um. PV-Paneele lassen auch etwas Lichtenergie durch, was wiederum in unbegrünten Böden zu einer größeren Wärmeabsorption führt. Diese erhöhte Absorption könnte zu einem größeren fühlbaren Wärmeabfluss aus dem Boden führen, der unter den PV-Paneelen eingeschlossen werden kann. Ein PVHI-Effekt wäre das Ergebnis eines nachweisbaren Anstiegs des fühlbaren Wärmestroms (atmosphärische Erwärmung), der sich aus einer Veränderung des Gleichgewichts der ein- und ausgehenden Energieströme aufgrund der Landschaftsumwandlung ergibt. Die Entwicklung eines vollständigen thermischen Modells ist eine Herausforderung[17,18,25], und es gibt große Unsicherheiten in Bezug auf mehrere Terme, einschließlich Variationen der Albedo, der Wolkenbedeckung, der Saisonalität der Advektion und der Effizienz der Paneele, die selbst dynamisch ist und von der lokalen Umgebung beeinflusst wird. Diese Unsicherheiten werden durch den Mangel an empirischen Daten noch verstärkt.

Wir haben uns mit dem Mangel an direkter Quantifizierung eines PVHI-Effekts befasst, indem wir gleichzeitig drei Standorte überwacht haben, die ein natürliches Wüstenökosystem, die traditionelle bebaute Umgebung (Parkplatz umgeben von Geschäftsgebäuden) und ein PV-Kraftwerk repräsentieren. Wir definieren einen PVHI-Effekt als den Unterschied in der Umgebungstemperatur zwischen dem PV-Kraftwerk und der Wüstenlandschaft. In ähnlicher Weise wird UHI als der Temperaturunterschied zwischen der bebauten Umgebung und der Wüste definiert. Wir reduzierten störende Effekte der Variabilität der lokal einfallenden Energie, der Temperatur und des Niederschlags, indem wir Standorte verwendeten, die innerhalb eines Gebiets von 1 km lagen.

An jedem Standort überwachten wir die Lufttemperatur kontinuierlich über ein Jahr lang mit aspirierten Temperatursonden 2,5 m über der Bodenoberfläche. Die durchschnittliche Jahrestemperatur betrug 22,7 ±0,5 °C in der PV-Anlage, während sie im nahegelegenen Wüstenökosystem nur 20,3 ±0,5 °C betrug, was auf einen PVHI-Effekt hinweist. Die Temperaturunterschiede zwischen den Gebieten variierten signifikant in Abhängigkeit von der Tageszeit und dem Monat des Jahres (Abb. 2), aber die PV-Anlage hatte immer eine höhere oder gleiche Temperatur als die anderen Standorte. Wie beim UHI-Effekt in Trockengebieten verzögerte der PVHI-Effekt die Abkühlung der Umgebungstemperaturen am Abend, was den signifikantesten Unterschied bei den Nachttemperaturen über

alle Jahreszeiten hinweg ergab. Die jährlichen durchschnittlichen Mitternachtstemperaturen betrugen in der PV-Anlage 19,3 ±0,6 °C, während es im nahegelegenen Wüstenökosystem nur 15,8 ±0,6 °C waren. Dieser PVHI-Effekt war in Bezug auf die tatsächlichen Erwärmungsgrade (+3,5 °C) in den warmen Monaten (Frühling und Sommer; Abb. 3, rechts) deutlicher.

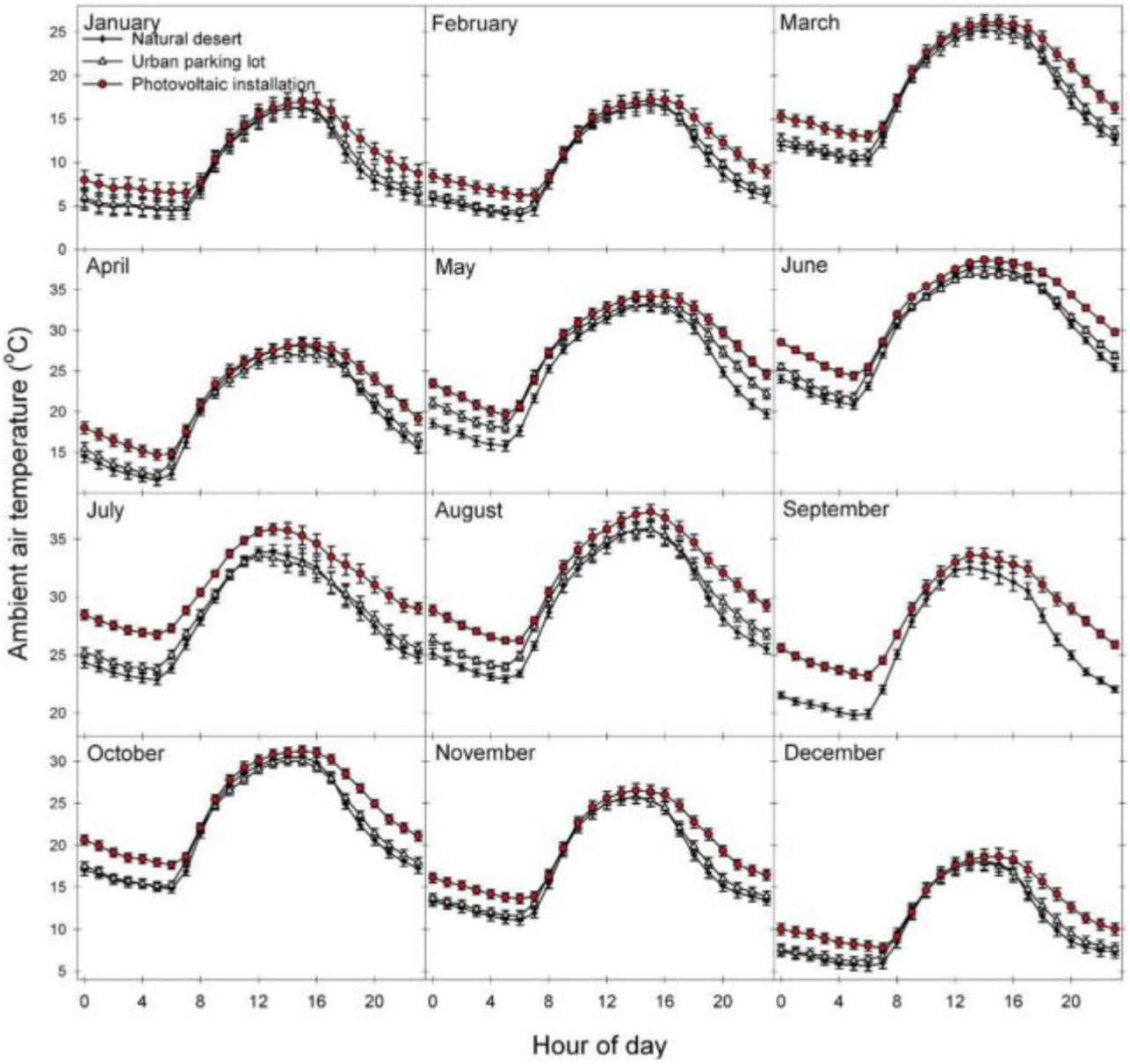

Abbildung 2. Die durchschnittlichen monatlichen Umgebungstemperaturen während eines 24-Stunden-Zeitraums liefern den Beweis für den Effekt einer photovoltaischen Wärmeinsel (PVHI).

Sowohl in PVHI- als auch in UHI-Szenarien absorbiert die größere Menge an exponierten Bodenflächen im Vergleich zu natürlichen Systemen einen größeren Anteil der energiereichen, kurzwelligen Sonnenstrahlung während des Tages. In Kombination mit minimalen

Raten wärmeableitender Transpiration der Vegetation wird eine proportional höhere Menge an gespeicherter Energie als langwellige Strahlung während der Nacht in Form von fühlbarer Wärme abgestrahlt (Abb. 1)15. Da PV-Installationen eine Beschattung mit einem Material einführen, das selbst nicht viel einfallende Strahlung speichern sollte, könnte man annehmen, dass die Auswirkung eines PVHI-Effekts geringer sein würde als die eines UHI. Hier haben wir festgestellt, dass der Unterschied in der abendlichen Umgebungstemperatur zwischen der PV-Anlage und dem Wüstenstandort durchweg größer war als zwischen dem Parkplatz (UHI) und dem Wüstenstandort (Abb. 3). Der PVHI-Effekt führte dazu, dass die Umgebungstemperatur abends regelmäßig annähernd oder mehr als 4 °C höher lag als in der natürlichen Wüste, was im Wesentlichen eine Verdoppelung des hier gemessenen Temperaturanstiegs aufgrund von UHI bedeutet. Diese stärkere Erwärmung unter dem PVHI als unter dem UHI könnte auf den Wärmeeinschluss des zurückgestrahlten fühlbaren Wärmestroms unter den PV-Anlagen in der Nacht zurückzuführen sein. Tagsüber waren die Unterschiede zum natürlichen Ökosystem zwischen der PV-Anlage und den städtischen Parkplätzen ähnlich, mit Ausnahme der Frühlings- und Sommermonate, in denen der PVHI-Effekt tagsüber deutlich größer war als der UHI. Während dieser warmen Jahreszeiten betrugen die durchschnittlichen Mitternachtstemperaturen 25,5 +0,5 °C in der PV-Anlage und 23,2 +0,5 °C auf dem Parkplatz, während das nahe gelegene Wüstenökosystem nur 21,4 ±0,5 °C aufwies.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass der PVHI-Effekt real ist und die Temperaturen über PV-Kraftwerksanlagen im Vergleich zu nahegelegenen Wildlandschaften deutlich erhöhen kann. Detailliertere Messungen der zugrundeliegenden Ursachen des PVHI-Effekts, möglicher Minderungsstrategien und des relativen Einflusses von PVHI im Zusammenhang mit den inhärenten Kohlenstoffkompensationen aus der Nutzung dieser erneuerbaren Energie sind erforderlich. Daher werfen wir mehrere neue Fragen auf und weisen auf kritische Unbekannte hin, die zukünftige Forschung erfordern.

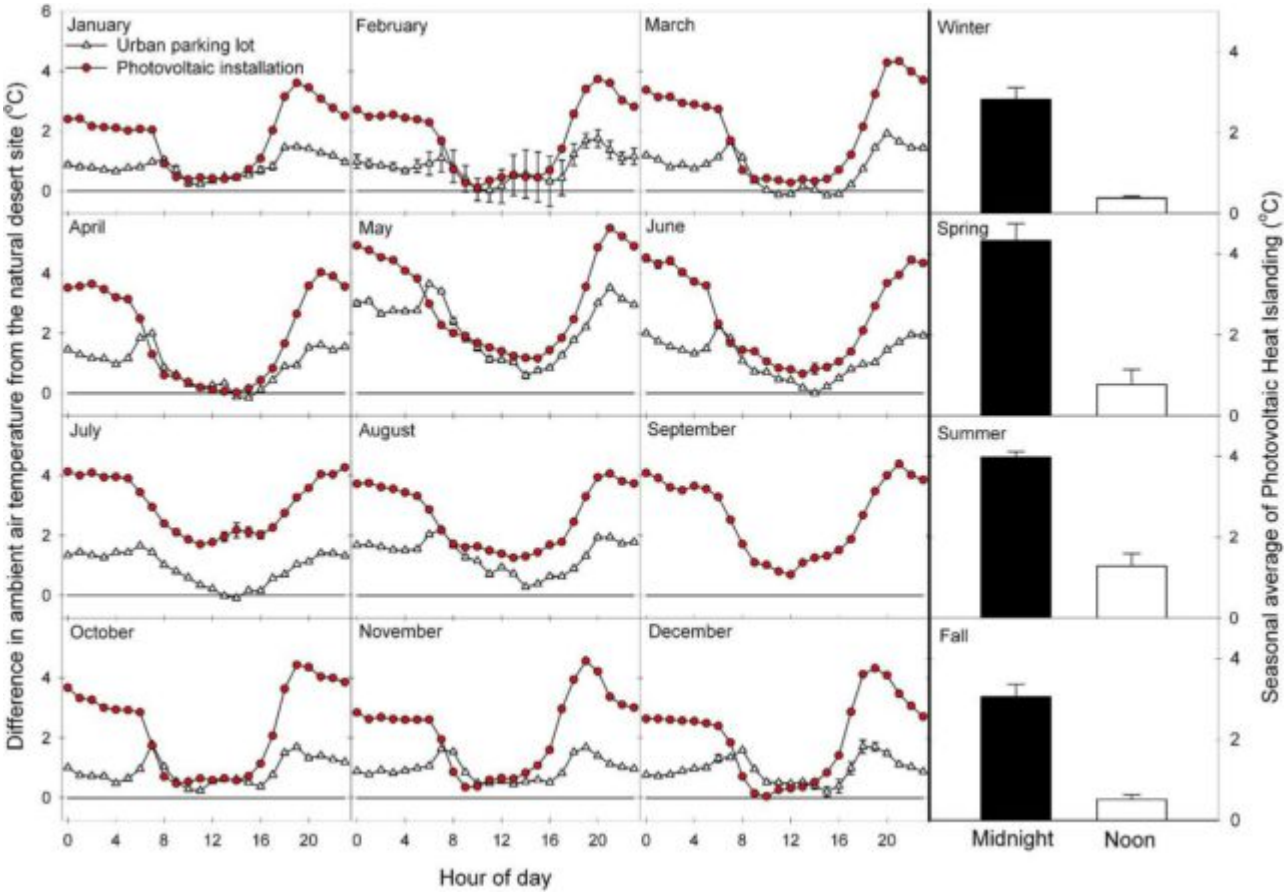

Abbildung 3. **Links**: Durchschnittliche monatliche Werte der photovoltaischen Wärmeinsel (Umgebungstemperaturdifferenz zwischen PV-Anlage und Wüste) und der städtischen Wärmeinsel (Umgebungstemperaturdifferenz zwischen dem städtischen Parkplatz und der Wüste). **Rechts**: Durchschnittliche Nacht- und Tagestemperaturen für vier saisonale Zeiträume, die einen signifikanten PVHI-Effekt über alle Jahreszeiten hinweg zeigen, wobei der größte Einfluss auf die Umgebungstemperaturen in der Nacht besteht.

Welche physikalische Grundlage haben Landschafts-Veränderungen, die einen PVHI-Effekt verursachen könnten?

Wir stellen die Hypothese auf, dass der PVHI-Effekt aus dem effektiven Übergang resultiert, wie sich Energie in und aus einer PV-Anlage im Vergleich zu einem natürlichen Ökosystem bewegt. Die Messung der einzelnen Komponenten eines Energiefluss-Modells bleibt jedoch eine notwendige Aufgabe. Diese Messungen sind schwierig und teuer, aber dennoch unerlässlich, um den relativen Einfluss mehrerer potenzieller Treiber des hier gefundenen PVHI-Effekts zu identifizieren. Die Umweltbedingungen, die die Muster der Kohlenstoff-, Energie- und Wasserdynamik im Ökosystem bestimmen, werden durch die Art und Weise angetrieben, in der die eintreffende Energie reflektiert oder absorbiert wird. Da uns grundlegende Kenntnisse über die Veränderungen der

Oberflächenenergieflüsse und des Mikroklimas von Ökosystemen fehlen, die diese Landnutzungsänderung durchlaufen, können wir die Auswirkungen auf den Kohlenstoff- oder Wasserkreislauf kaum vorhersagen[4,8].

Welche physikalischen Implikationen hat ein PVHI, und wie variiert dieser von Region zu Region?

Die Größe eines UHI wird durch Eigenschaften der Stadt bestimmt, einschließlich der Gesamtbevölkerung[26-28], der räumlichen Ausdehnung und der geografischen Lage dieser Stadt[29-31]. In ähnlicher Weise sollten wir die räumliche Ausdehnung und die geografische Lage einer PV-Anlage berücksichtigen, wenn wir das Vorhandensein und die Bedeutung des PVHI-Effekts betrachten. Die Fernerkundung könnte mit bodengestützten Messungen gekoppelt werden, um die laterale und vertikale Ausdehnung des PVHI-Effekts zu bestimmen. Wir könnten dann feststellen, ob die Größe des PVHI-Effekts mit irgendeinem Maß des Kraftwerks skaliert (z. B. mit der Paneeldichte oder dem räumlichen Fußabdruck) und ob ein PVHI-Effekt umliegende Gebiete wie Wildnis und Nachbarschaft erreicht oder nicht. In Anbetracht der Tatsache, dass verschiedene Regionen rund um den Globus jeweils unterschiedliche Hintergrundniveaus der vegetativen Bodenbedeckung und thermodynamische Muster des latenten und sensiblen Wärmeaustauschs aufweisen, ist es möglich, dass ein Übergang von einer natürlichen Wildnis zu einem typischen PV-Kraftwerk andere Ergebnisse als die hier dargestellten zeigt. Der Mangel an Daten über die physikalischen Auswirkungen dieser wichtigen und zunehmenden Landnutzungs- und Landbedeckungs-Änderung rechtfertigt weitere Studien an repräsentativen Ökosystemen.

Welche Auswirkungen hat ein PVHI auf die Menschen, und wie können wir diese Auswirkungen abschwächen?

Mit der wachsenden Popularität der erneuerbaren Energieerzeugung werden die Grenzen zwischen Wohngebieten und größeren PV-Anlagen immer kleiner. Tatsächlich führt die größere Nähe zu Wohngebieten zu verstärkten Forderungen nach Zoneneinteilung und Stadtplanungsvorschriften für größere PV-Anlagen[32,33] sowie zu PVHI-basierten Bedenken über potenzielle Reduzierungen des Immobilienwerts oder gesundheitliche Probleme im Zusammenhang mit dem menschlichen Wärmekomfort (HTC)[34]. Die Abschwächung eines PVHI-Effekts durch gezielte Begrünung könnte Synergieeffekte haben, indem sie die mit der Entwicklung eines PV-Standorts im Versorgungsmaßstab verbundene Verschlechterung des Ökosystems abschwächt und die mit einem Gebiet verbundenen kollektiven

Ökosystemleistungen erhöht[4]. Aber was sind die besten Ausgleichsmaßnahmen? Welche Kompromisse gibt es in Bezug auf die verschiedenen Möglichkeiten der Begrünung von degradierten PV-Anlagen? Können andere Albedo-Modifikationen verwendet werden, um die Schwere des PVHI zu mildern?

Abbildung 4. Experimentelle Standorte. Die Überwachung eines (1) natürlichen semiariden Wüstenökosystems, (2) einer Solaranlage (PV) und (3) eines „städtischen“ Parkplatzes – der typischen Quelle städtischer Wärmeinseleffekte – innerhalb eines 1 km² großen Gebiets ermöglichte eine relative Kontrolle der einfallenden Solarenergie, so dass wir die Variation der lokalen Temperatur dieser drei Umgebungen über einen Zeitraum von einem Jahr quantifizieren konnten. Das Google Earth-Bild zeigt die Solarzone des Wissenschafts- und Technologieparks der *University of Arizona*.

Um diese Ergebnisse im Hinblick auf die globale Erwärmung vollständig in einen Zusammenhang zu stellen, muss man die relative Bedeutung der (global gemittelten) Abnahme der Albedo aufgrund von PV-Kraftwerken und der damit verbundenen Erwärmung durch die PVHI gegen die mit PV-Kraftwerken verbundenen Kohlendioxid-Emissionsreduktionen abwägen. Die hier vorgestellten Daten stellen die erste experimentelle und empirische Untersuchung des Vorhandenseins eines Wärmeinseleffekts in Verbindung mit PV-Kraftwerken dar. Ein integrierter Ansatz für die physikalischen und sozialen Dimensionen der PVHI ist der Schlüssel zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bezüglich der PV-Entwicklung.

Es folgen genaue Beschreibungen der angewendeten Verfahren, der untersuchten Pflanzen und der Methoden der statistischen Auswertung. Diese werden hier nicht mit übersetzt. Danach folgt eine lange Liste mit Querverweisen, die hier ebenfalls nicht mit aufgeführt ist. Sie sind im DOC-Dokument einsehbar.

Link: https://www.nature.com/articles/srep35070

Übersetzt von Chris Frey EIKE

doc