

Das Land-Atmosphäre-System der Erde

Die „Erdung“ von Wetter- und Klimaprozessen

VOLKER WULFMAYER | LISA JACH | OLIVER BRANCH | MARCUS BREIL



Blick über das LAFO-Gebiet auf der Versuchsstation Heidfeldhof der Universität Hohenheim in Stuttgart. Im Vordergrund sind die zentralen Messgeräte zu sehen. Graues Gehäuse links: der Atmospheric Raman Temperature and Humidity Sounder (ARTHUS). Davor: ein abtastendes Polarisations-Doppler-Wolkenradar. Dahinter: ein Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidar (WVDIAL). Auf dessen Dach rechts: ein Doppler-Lidar.

Das System Land-Atmosphäre umfasst die unterste Atmosphärenschicht inklusive des Bodens. Dort lebt fast die gesamte Menschheit, dort sichert die Landwirtschaft die Welt-ernährung. Mit dem Klimawandel wächst besonders hier die Bedrohung durch Wetter-Extrema, von Dürren bis zu Starkniederschlägen. Um diese Extrema besser in Modellen simulieren zu können, ist ein genaueres physikalisches Verständnis der komplexen Prozesse in diesem Teil des Erdsystem essenziell. Daher ist diese Forschung auch wichtig für Klimaanpassungsstrategien.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Das Erdsystem besteht aus Komponenten, die über Austauschprozesse und Erhaltungssätze miteinander gekoppelt sind. Ein besonderes Teilsystem besteht aus dem Land und der Atmosphäre. Dieses System umfasst den Boden, die Landbedeckung und die untere Troposphäre. Die Rückkopplungen zwischen Land und Atmosphäre (L-A) sind das Ergebnis der Wechselwirkung von Prozessen im Zusammenhang mit dem Austausch und der Erhaltung von Impuls, Energie und Masse. Die physikalischen Variablen für den Transport werden als *Flüsse* bezeichnet. Dieser Artikel soll einen Überblick über das L-A-System geben und erklären, wie dieses System analysiert und verstanden werden kann.

Zunächst müssen wir uns dazu die grundlegenden Schichten und Wechselwirkungen anschauen. Abbildung 1 zeigt die wichtigsten Variablen und Wechselwirkungen im L-A-System bei Tage. Die durchgezogenen Pfeile stellen eine positive Rückkopplung und die gestrichelten eine negative Rückkopplung dar. Eine positive Rückkopplung bedeutet, dass ein Anstieg einer Variablen zu einer Zunahme der gekoppelten Variablen führt. Die verschiedenen Variablen werden in der Bildunterschrift definiert. Die zentrale Box stellt alle Prozesse in einer Säule dar, in welcher der Boden, die Vegetation und die Atmosphäre als horizontal homogen betrachtet werden. Sind nur diese Interaktionen relevant, sprechen wir von *lokaler Kopplung*. Spielen auch Austauschprozesse mit den umgebenden Boxen eine wichtige Rolle, darunter Strömungen zwischen ihnen, sprechen wir von *nichtlokaler Kopplung*.

Bei diesen Austauschprozessen entstehen charakteristische vertikale Schichten oder Höhen im L-A-System, die auf der Abbildung 1 rechts dargestellt sind. Es ist notwendig, diese getrennt voneinander zu vermessen und zu untersuchen, da ihre Eigenschaften grundlegend für die vertikalen Austauschprozesse sind. Dazu gehören der Boden mit seinem Grundwasserspiegel und den verschiedenen Wurzeltiefen der Vegetation. Darauf wächst die Vegetationsschicht mit ihrer Höhe *CL*. Die Rauigkeitsschicht mit der Höhe *RS* ist das Resultat von Inhomogenitäten in den Höhen des unbewachsenen und des bewachsenen Bodens und hat typischerweise eine Dicke von einigen Metern. Die Prandtl-Schicht mit der Höhe *SL* wird durch nahezu höhenunabhängige Flüsse definiert.

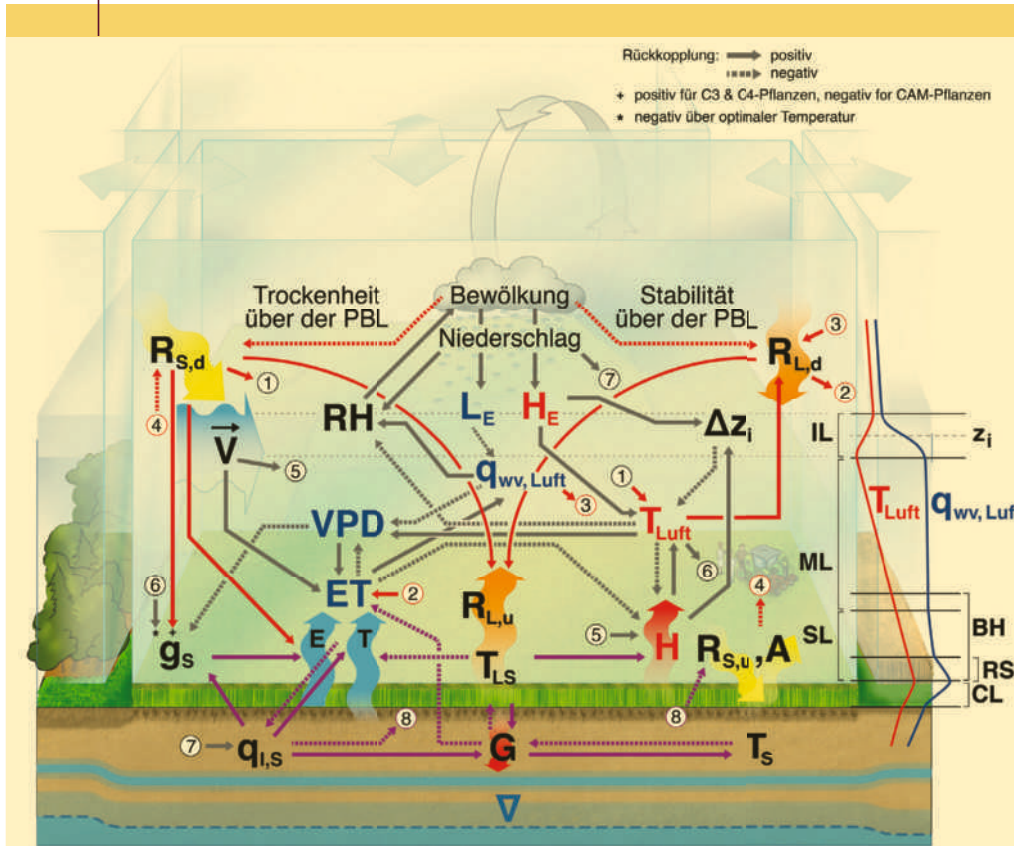
Sie erstreckt sich über eine Höhe von 10-100 m (siehe auch Physik in unserer Zeit **2024**, 55(1), 20). Die Blendungshöhe BH ist die Höhe, bei der die Flüsse unabhängig von der Heterogenität des Bodens werden. Ihre Existenz und Höhe sind bisher kaum untersucht worden, obwohl sie postuliert wurde und zur Darstellung der vertikalen Flüsse sehr nützlich sein kann. An die Prandtl-Schicht schließt sich die Mischungsschicht ML an, in der das mittlere Profil der spezifischen Feuchte $q_{wv,air}$, die Dichte des Wasserdampfs geteilt durch die Dichte der feuchten Luft, typischerweise nahezu konstant ist.

Die turbulente Schicht über dem Boden bei Tage wird als *konvektive planetare Grenzschicht* (convective Planetary Boundary Layer, PBL) bezeichnet. Ihre Höhe ist z_i , und um diese erstreckt sich die Inversionsschicht IL , die im Allgemeinen stabil geschichtet ist. Die Dicke der Inversionsschicht ist üblicherweise einige 10 m, und die Höhe der PBL kann sich je nach Einstrahlung und Wetterbedingungen bei Tage in mittleren Breiten von einigen 100 m bis 3000 m erstrecken. Alle diese Variablen und deren Interaktionen besitzen einen ausgeprägten Tagesgang aufgrund der Einstrahlung der Sonne. Es ist besonders wichtig, das L-A-System bei Tag zu untersuchen, da die resultierende instabile Schichtung über der Landoberfläche und die Verstärkung der vertikalen Flüsse besonders zu Wolkenbildung und Niederschlag führen können.

Durch die Rückkopplungen entwickeln sich alle Variablen im L-A-System simultan. Die Entwicklung dieser Variablen kann also nicht voneinander getrennt voneinander betrachtet werden und hängt unter anderem stark von dem Zustand in der Vergangenheit ab. *Deswegen ist jede Temperatur und jede Luftfeuchtigkeit in der bodennahen Atmosphärenschiicht zu jeder Zeit und an jedem Ort über Land ein Resultat der L-A-Rückkopplung und kann ohne diese Wechselwirkungen weder verstanden noch simuliert werden.*

Anhand Abbildung 1 lassen sich schon einige Zyklen der Rückkopplungen verstehen. Beispielsweise führt eine Erhöhung des Bodenfeuchtegehalts $q_{l,s}$ (links unten, durchgezogener Pfeil) im Allgemeinen zu einer Erhöhung sowohl der Evaporation (Verdunstung) E direkt vom Boden als auch der Transpiration T der Pflanzen. Diese Evapotranspiration ET reduziert wiederum den Bodenfeuchtegehalt (gestrichelter Pfeil). Hier finden wir also einen selbstregulierenden Zyklus zwischen diesen Variablen. Eine Erhöhung der Evapotranspiration ET führt zu einer höheren Luftfeuchtigkeit $q_{wv,Luft}$ und einer gesteigerten relativen Feuchte RH (durchgezogene Pfeile). Diese Entwicklung erhöht die Wahrscheinlichkeit der Wolken- und Niederschlagsbildung. Solche Prozesse verstärken den Austausch der Luftfeuchtigkeit an der Oberkante der planetaren

ABB. 1 | RÜCKKOPPLUNGSPROZESSE IM LAND-ATMOSPÄRE-SYSTEM



Die Pfeile zeigen Rückkopplungen zwischen den Variablen an. Der Übersichtlichkeit halber sind einige Pfeile getrennt, die Verbindungen sind durch Zahlen gekennzeichnet (Tunnel zwischen Pfeilen). Zentrale Box: $R_{S,d}; L_w; S_w; L_d$. Nach oben und unten gerichtete kurz- und langwellige Strahlungsdichten, A : Albedo, RH : relative Feuchte, L_E und H_E : latente und fühlbare Wärmefflüsse an der Oberkante der planetaren Grenzschicht (Entrainment-Flüsse), Δz_i : Änderung der Grenzschichthöhe, V : horizontaler Wind, VPD : Wasserdampf-Druckdefizit, $q_{wv, Luft}$: spezifische Feuchte, g : Leitfähigkeit der Vegetation, ET : Evapotranspiration, E : Evaporation, T : Transpiration, T_{Luft}, T_{LS}, T_s : Landoberflächen-, und Bodentemperaturen, H : fühlbarer Wärmeffluss, $q_{l,s}$: Bodenfeuchtegehalt, G : Bodenwärmefluss, V : Grundwasserspiegel. Klammern und Kurven auf der rechten Seite: Typische vertikale Erstreckungen der verschiedenen Schichten in Boden, in der Vegetation und in der Atmosphäre sowie Profile von $q_{wv, Luft}$ and T_{Luft} während des Tages; CL : Vegetationsschicht, RS : Rauigkeitsschicht, SL : Prandtl-Schicht, BH : Blendungshöhe, ML : Mischungsschicht, IL : Inversionsschicht (nach [21, 22]).

ABB. 2 | LAFO IN STUTTART



Lage und Aufbau von LAFO bei der Universität Hohenheim in Stuttgart. Unten ist der Flughafen von Stuttgart zu sehen. Der zentrale Teil von LAFO befindet sich über landwirtschaftlich geprägten Flächen der Versuchsstation Heidfeldhof. Insgesamt ist das Gelände ist sehr heterogen und auch durch urbane Flächen sowie kleine Waldflächen geprägt.

Grenzschicht durch den sogenannten Entrainment-Fluss L_E (durchgezogener Pfeil). Eine Erhöhung dieses Flusses verringert aber die Luftfeuchtigkeit in der Grenzschicht. Hier finden wir also einen weiteren selbstregulierenden Zyklus für das Wasser im L-A-System, der aber wesentlich komplexer ist und bei dem die PBL eine entscheidende Rolle spielt.

Fast alle Menschen leben im L-A-System

Die bisherigen Betrachtungen unterstreichen bereits die Bedeutung der L-A-Systemforschung. Zudem leben im L-A-System fast alle Menschen, hier wird auch die Landwirtschaft betrieben. Es ist daher dringend geboten, ein tiefgreifendes Verständnis und eine Darstellung der L-A-Rückkopplungen in allen Regionen und unter allen atmosphärischen Situationen zu entwickeln. Dieses Verständnis ist unerlässlich für genaue Erdsystemanalysen und Simulationen auf sämtlichen räumlichen und zeitlichen Skalen. Dazu gehören Wettervorhersagen, mittelfristige bis saisonale Vorhersagen und Klimaprognosen. L-A-Rückkopplungen bestimmen auch die Auswirkungen von Landnutzungs- und Landbedeckungsänderungen auf die regionale Hydrologie, Wetter und Klima.

Die Auswirkungen des Klimawandels und die Interaktion zwischen Wasser- und Kohlenstoffflüssen werden stark durch L-A-Rückkopplungen beeinflusst [1]. Darüber hinaus können Hitzewellen und Dürren durch L-A-Rückkopplungen intensiviert werden [2]. Numerische Modelle weisen jedoch tendenziell Schwächen bei der Darstellung von Extremereignissen auf, da sie dazu neigen, die L-A-Kopplungsstärke zu überschätzen [3]. Dieser Mangel ist kritisch, insbesondere angesichts der Tatsache, dass Extreme durch den Klimawandel verstärkt werden. Genauere Simulationen erfordern eine verbesserte Darstellung der L-A-Wechselwirkungen in Bezug auf die Reaktionen der Vegetation auf Dürre und Hitzestress [4]. Ein detailliertes Verständnis der Rückkopplungen ist auch die Grundlage für eine vertrauenswürdige Analyse von Bio-Geoengineering-Techniken zur Abmilderung der Auswirkungen des Klimawandels [5].

Deswegen hat die Erforschung des L-A-Systems höchste Priorität im Rahmen des Weltklimaforschungsprogramms (World Climate Research Programme, WCRP, siehe „Internet“ auf S. 9) insbesondere im Rahmen seines größten Forschungsprogramms Global Energy and Water Exchanges (GEWEX, siehe „Internet“). Die Forschung von GEWEX wird durch verschiedene Panels durchgeführt. Das Global Land Atmosphere System Study (GLASS) Panel („Internet“) ist das Team, das sich auf das L-A-System konzentriert. Volker Wulfmeyer ist das erste deutsche Mitglied und einer der nächsten Vorsitzenden des GLASS Panel, und viele Aspekte, die in diesem Artikel diskutiert werden, sind Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen in diesem Panel sowie unserer Forschungsarbeiten an der Universität Hohenheim (UHOH) in Stuttgart.

Beobachtungen am L-A-System

Wie kann solch ein komplexes System untersucht werden? Hier stehen wir vor der prinzipiellen Problematik, dass es keinen Anfang und kein Ende für die Entwicklung einer bestimmten Variablen gibt. Alle Variablen sind das Resultat ihrer Ko-Entwicklungen und Wechselwirkungen im L-A-System. Diese sind jeden Tag und zu jeder Tageszeit unterschiedlich. Eine Grundlage für die Vorgehensweise zeigt ebenfalls Abbildung 1. Da sich alle Variablen simultan entwickeln, ist es offensichtlich notwendig, diese auch simultan zu messen und zu modellieren, um deren Interaktionen vollständig zu verstehen. Es reicht nicht, sich mit den Wechselwirkungen zwischen dem Boden und der Vegetation bis zu den Flüssen an der Landoberfläche zu befassen. Man spricht hier auch vom *terrestrischen Zweig* des L-A-Systems. Es müssen parallel dazu auch die Wechselwirkungen der Flüsse an der Landoberfläche mit der Entwicklung der PBL untersucht werden – der *atmosphärische Zweig*. Das Verständnis beider Zweige und deren Wechselwirkung müssen zusammengeführt und gemeinsam

betrachtet werden. Im Folgenden stellen wir den Stand der Messungen und Simulationen des L-A-Systems vor.

Die Notwendigkeit einer holistischen Beobachtung des L-A-Systems wurde schon vor langer Zeit erkannt. Trotzdem konzentrieren sich die vielen weltweiten Messinitiativen fast ausschließlich auf Teilsysteme. Das mag mit der Disziplinarität der Forschungsansätze zu tun haben, mit einem Mangel an geeigneten Messgeräten in der Vergangenheit oder auch mit dem großen Aufwand und den hohen Kosten, die eine Erforschung des gesamten Systems mit sich bringt.

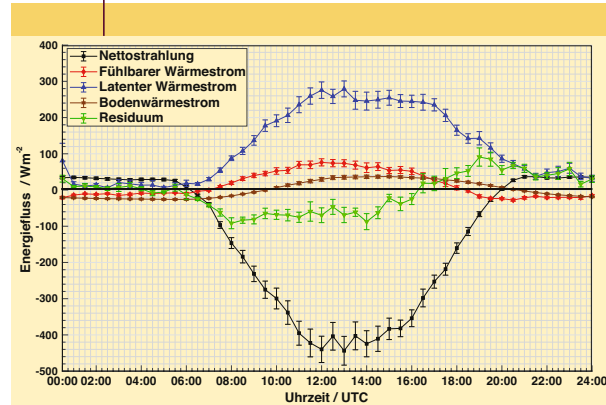
Was die Messungen im Boden und an der Landoberfläche betrifft, sind diese zumeist Initiativen aus der Hydrologie, den Bodenwissenschaften und Wissenschaften, die sich mit Austauschprozessen an der Landoberfläche beschäftigen. Dazu sind nationale und internationale Initiativen gegründet worden, wie das Integrated Carbon Observation System (ICOS) in Europa (siehe Physik in unserer Zeit 2020, 51(1), 22 und „Internet“), die Critical Zone Observatories (CZOs, „Internet“), das National Ecological Observatory Network (NEON, „Internet“) und Ameriflux („Internet“) in den USA sowie internationale Netzwerke wie Fluxnet („Internet“).

Allerdings haben alle diese Initiativen die Rückkopplung mit der Atmosphäre kaum im Blick, stattdessen konzentrieren sie sich hauptsächlich auf den terrestrischen Zweig. Die Messungen hören in der Prandtl-Schicht auf, und nur dort werden Flüsse gemessen, etwa der fühlbaren und latenten Wärme sowie von Kohlenstoffdioxid oder Methan, aber nicht an der Oberkante der planetaren Grenzschicht (PBL). Deswegen können solche Daten genutzt werden, um die Frage zu beantworten: „Wie groß sind die Flüsse und deren Statistiken an der Landoberfläche in Abhängigkeit vom Bewuchs?“ Jedoch können damit nicht die weitergehenden wissenschaftlichen Fragen beantwortet werden wie: „Warum sind diese Flüsse so groß und wie teilen sich diese auf?“ Diese Frage kann nur unter Einbeziehung von Atmosphärenmessungen bis zur Oberkante der PBL erforscht werden, also mit dem atmosphärischen Zweig.

Dagegen konzentrieren sich die meteorologischen Observatorien wie das Meteorologische Observatorium Lindenberg – Richard-Aßmann-Observatorium (MOL-RAO) des Deutschen Wetterdienstes (DWD), das Ruisdael Observatorium in Cabauw, Niederlande, oder das Observatorium in Payerne von MeteoSchweiz hauptsächlich auf die Messung von Flüssen an der Landoberfläche bis zur Oberkante der PBL, aber weniger auf die Eigenschaften der Vegetation und des Bodens. Diese meteorologischen Observatorien fokussieren sich also hauptsächlich auf den atmosphärischen Zweig.

Es ist offensichtlich notwendig, die terrestrischen und atmosphärischen Prozesse gleichzeitig zu vermessen, indem diese Arbeiten kombiniert und koordiniert werden. Das ist Gegenstand eines neuen GLASS-Projekts, das von Volker Wulfmeyer geleitet wird. Dazu

ABB. 3 | ENERGIEHAUSHALT



Beispiel für die Schließung des Energiehaushaltes an der Landoberfläche über Winterweizen am südlichen Standort bei LAFO (unterer roter Kreis in Abbildung 2). Flüsse, die von der Landoberfläche nach oben gerichtet sind, haben ein positives Vorzeichen, Flüsse in der umgekehrten Richtung ein negatives. Typischerweise ist der Energiehaushalt nicht komplett geschlossen. Dieser Verlust, der hauptsächlich durch Heterogenitäten der Landoberfläche zustande kommt, ist Gegenstand von Forschungsprojekten, wie die Forschungsgruppe 5639 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Fühlbarer Wärmefluss: Wärmefluss, der zu einer unmittelbaren Temperaturänderung führt; latenter Wärmefluss: Wärmefluss, der mit Phasenübergängen verbunden ist, hier vor allem in Verdampfen von Wasser, und keine Temperaturänderung bewirkt.

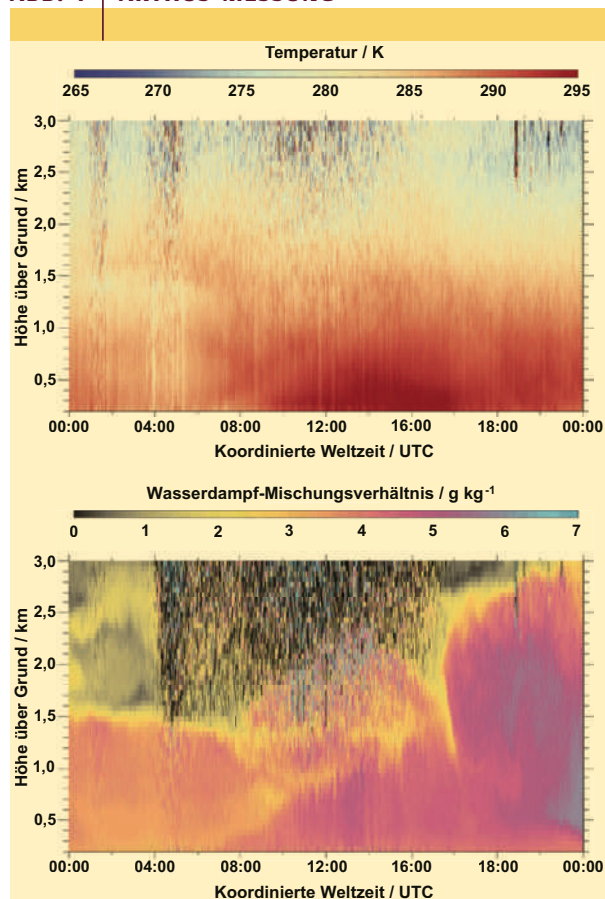
soll eine neue Klasse von Observatorien gegründet werden, die als GEWEX Land-Atmosphäre Feedback Observatories (GLAFOs) bezeichnet werden (siehe [6] und „Internet“). Ein Prototyp dieser GLAFOs wurde im Jahr 2019 bei uns an der UHOH in Stuttgart aufgebaut (siehe [7] und „Internet“). Abbildung 2 stellt die Lage von LAFO an der UHOH und die Verteilung der Messgeräte im Luftbild dar. Die Messgeräte bestehen aus einem Netzwerk von Bodentemperatur und -feuchtesensoren sowie zwei Messtürmen, unter anderem mit Sensoren für Flussmessungen (siehe Zusatztext „Überblick über die Messgeräte und Messvariablen von LAFO“, Näheres unter „Literatur“).

Abbildung 3 zeigt eine der wichtigsten Messungen: die einzelnen Komponenten des Energiehaushalts an der Landoberfläche. Deren Aufteilung stellt eine fundamentale Charakteristik des L-A-Systems in der Untersuchungsregion dar und ist abhängig von der Landnutzung und den Eigenschaften des Bodens. In Abbildung 3 kann man sehen, dass in den mittleren Breiten der Nettostrahlungseintrag gegen Mittag im Sommer etwa 450 W/m² beträgt. Dieser wird hauptsächlich durch die Evapotranspiration als wichtigster Austauschprozess mit einem Wert von etwa 300 W/m² ausbalanciert. Das ist dann der Fall, wenn genügend Bodenfeuchte vorhanden ist und kein Hitzestress vorliegt. Der nächstwichtigste Term ist der fühlbare Wärmestrom mit einem Wert von etwa 80 W/m². Der Bodenwärmestrom spielt üblicherweise

eine geringe Rolle, wenn dichter Bewuchs vorliegt. Die genauen Werte hängen von den Eigenschaften des Bewuchses und dessen Vegetationszustand ab – in Europa sind dies bei landwirtschaftlichen Flächen zum Beispiel hauptsächlich Weizen und Mais.

Über einen längeren Zeitraum von 30-60 min könnte man erwarten, dass der Energiehaushalt geschlossen ist, aber das ist nicht der Fall. Es tritt ein deutliches Residuum auf (grüne Symbole), das als Maß für die Heterogenität der Umgebung angesehen werden kann. Es ist um so größer, je variabler die fühlbaren und latenten Wärmeflüsse in der Umgebung sind, und hängt davon ab, wie stark der horizontale Transport von Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Advektion) in das Messgebiet ist. Diese Advektion und diese Inhomogenitäten treten in Europa über Land generell in sehr verschiedenen Skalenlängen auf, sodass deren Effekte offensichtlich in der Untersuchung des L-A-Systems berücksichtigt werden müssen [8].

ABB. 4 | ARTHUS-MESSUNG



Oberes Bild: Zeit-Höhendiagramm der Temperatur gemessen mit Auflösungen von 100 m und 10 s gemessen am MOL-RAO des Deutschen Wetterdienstes in Lindenberg, Deutschland, am 9. September 2021. Untere Abbildung: entsprechendes Diagramm für das Wasserdampf-Mischungsverhältnis. Die Abbildungen zeigen, dass die faszinierende Turbulenzstruktur der PBL und die Temperaturinversion an der Oberkante der PBL bei Tage nun aufgelöst und untersucht werden können.

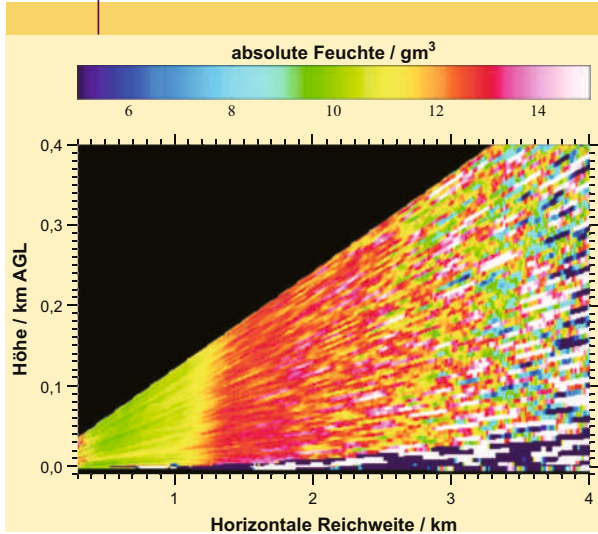
Dazu müssen wir sowohl die Vertikalprofile als auch die horizontalen Verteilungen des Windes sowie der atmosphärischen Temperatur und der Luftfeuchtigkeit vermessen. Dieses ist nun seit einigen Jahren möglich, und hier hat die Universität Hohenheim Pionierarbeit geleistet. Das Institut für Physik und Meteorologie entwickelte dafür das neue Fernerkundungssystem ARTHUS (Atmospheric Raman Temperature and Humidity Sounder, [9]), das auf der Raman-Lidar-Methode basiert [10]; Lidar ist ein Akronym für Light Detection and Ranging. ARTHUS ist in der Lage, Tag und Nacht mit bisher unerreichten Auflösungen von 10 s und 100 m gleichzeitig Vertikalprofile der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit zu vermessen.

Ein Messbeispiel ist in Abbildung 4 zu sehen. Am Meteorologischen Observatorium Lindenberg – Richard Aßmann Observatorium (MOL-RAO) des Deutschen Wetterdienstes in Lindenberg, Deutschland, war ARTHUS etwa zwei Monate lang in Betrieb. Die Ergebnisse sind in Zeit-Höhen-Diagrammen für den 9. September 2021 über einen gesamten Tagesgang visualisiert. Es sind deutlich die Entwicklung der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit in der PBL zu sehen, inklusive der turbulenten Wirbel, die so wichtig für die Untersuchung von Transportprozessen sind. Die PBL stieg in diesem Zeitraum auf eine Höhe von etwa 1300 m an, war aber durch die Turbulenz sehr variabel. Solche Messungen können nun ausgewertet werden, um den atmosphärischen Zweig inklusive seiner Flussprofile und Entrainment-Flüsse zu vermessen (L_E und H_E auf Abbildung 1) [11]. Viele Mischungsvorgänge sowie Schichten in der Troposphäre werden ebenfalls sichtbar gemacht. Diese sind von großer Bedeutung für die Atmosphärenforschung und die Wetterentwicklung.

Wie bereits gesagt, ist es notwendig, auch die horizontalen Verteilungen der Variablen im L-A-System zu vermessen, was lange nicht möglich war. Heute jedoch stehen Lidar-Systeme zur Verfügung, die nicht nur vertikal messen können, sondern auch zwei- bis dreidimensional, indem sie mit einem Scanner ausgestattet werden. Dazu zeigt Abbildung 5 einen vertikalen Schnitt durch ein Wasserdampf-feld, das mit dem sogenannten Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidar (WVDIAL) der Universität Hohenheim vermessen wurde. Diese Messung hat eine zeitliche Auflösung von etwa 70 s und eine horizontale räumliche Auflösung von 100-400 m. Damit sind wir in der Lage, die horizontale Struktur des Wasserdampf-feldes zu untersuchen. Zum Beispiel zeigt die Abbildung 5 den Antransport eines turbulenten Wirbels mit einem Durchmesser von etwa 1500 m, der charakteristisch für Austauschprozesse an der Landoberfläche ist. Weitere Abtastungen sind mit Doppler-Lidar, Drohnen oder faserbasierten optischen Systemen möglich [6, 12].

Wir können also feststellen, dass durch die Entwicklung und Anwendung neuartiger Messgeräte sowie durch deren geschickte Kombination eine viel tiefer gehende Vermessung des L-A-Systems möglich ist. Dazu wird ein Netzwerk von GLAFOs das Rückgrat darstellen.

ABB. 5 | HORIZONTALE MESSUNG



Schnitt durch ein Wasserdampf-feld mit einer Reichweite von 4000 m und bis zu einer Höhe von 400 m, gemessen am 23. August 2017 um 18:25 Weltzeit (UTC) über einen Zeitraum von 70 s. Die Messung zeigt den Antransport eines turbulenten Wirbels mit einer horizontalen Abmessung von etwa 1500 m; AGL: Höhe über Grund.

Simulationen des L-A-Systems

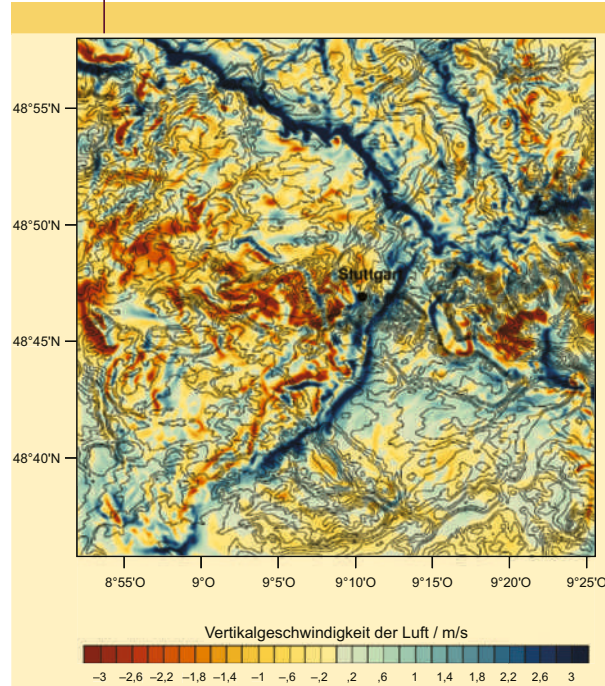
Auch in der Modellierung wurden in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte gemacht. Die Darstellung fundamentaler Prozesse in L-A-Modellen wurde vielfältig verbessert, das betrifft insbesondere die Wurzelwasseraufnahme, das Pflanzenwachstum und die resultierende Evapotranspiration. Außerdem ist heutzutage eine sehr hohe Auflösung der Modelle möglich.

Zum Beispiel kann mit bestimmten gekoppelten Landoberflächen-Atmosphären-(L-A)-Modellen inzwischen eine räumliche Auflösung von sage und schreibe 10 m über einer Region von etwa 15 km realisiert werden [13]. Die Simulationen mit dem L-A-Modell können damit einerseits Lücken der Beobachtungen schließen. Andererseits kann die Genauigkeit der Modellsimulationen mit den neuen Beobachtungen überprüft werden. Beobachtungen und Modellsimulationen sind also komplementär und unterstützen sich permanent gegenseitig. Die faszinierenden horizontalen Strukturen des Windfeldes können mit einer räumlichen Auflösung simuliert werden, die vor Jahren noch undenkbar war. Damit werden räumlich-zeitliche Untersuchungen der Turbulenz als wichtigem Austauschprozess im L-A-System möglich (Abbildung 6). Diese Modellgeneration wird neue Einblicke in die L-A-Rückkopplung liefern.

L-A-Metriken und tiefes Maschinenlernen

Sowohl Beobachtungen als auch Simulationen der neuen Generation liefern beide simultan Datensätze, welche die meisten Variablen des L-A-Systems enthalten. Als nächster Schritt stellt sich die Frage, wie die Stärke von Kopplungen im L-A-System verständlich dargestellt

ABB. 6 | MODELLSIMULATION



Simulation eines horizontalen Feldes des Vertikalwindes über Stuttgart und Umgebung in einer Höhe von etwa 50 m über dem Boden. Die horizontalen Strukturen kommen hauptsächlich durch die geologische Gestalt der Landschaft, die sogenannte Orographie, und die Entwicklung von Konvergenz-zonen zustande. Die Höhenkonturen des Terrains erstrecken sich von 100 bis 500 m, Angabe in 25-m-Schritten.

werden kann. Dazu wurde eine Reihe von Metriken entwickelt. Das Ziel einer L-A-Metrik ist es, zu charakterisieren und zu quantifizieren, wie stark die Kopplung ist. Die Herausforderung steckt in der Auswahl geeigneter Variablen, die genügen, um die Rückkopplung im Allgemeinen ausreichend darzustellen. Eine Übersicht der aktuellen Metriken gibt [14], hier stellen wir zwei typische Beispiele vor. Eines ist die Zwei-Zweige-Metrik, das andere das Mischungsdiagramm.

Die *Zwei-Zweige-Metrik* [15], englisch Two-Legged Coupling Index (TLCD), umfasst die beiden Zweige des L-A-Systems, den terrestrischen und den atmosphärischen Zweig. Sie wurde entwickelt, um einen einfachen Einblick über den Zusammenhang von Variablen zu bekommen, die über den Boden, die Vegetation und die Atmosphäre gekoppelt sind. Daraus erhalten wir ein statistisches Maß für die Stärke der Kopplung. Da die Korrelationen dieser Variablen von der Jahreszeit abhängen, sollte diese Metrik möglichst auf der saisonalen Skala angewendet werden. Hier werden also Daten benötigt, die mindestens über eine Zeitskala von mehr als 15 Tagen erhoben wurden. Wie kann solch eine Metrik definiert werden?

Dazu bietet es sich an, die Standardabweichung einer Variablen des Bodens, zum Beispiel der Bodenfeuchte $q_{1,s}$, als Gewicht zu benutzen. Dann charakterisiert man

die Sensitivität einer anderen Variablen, beispielsweise den Fluss an der Landoberfläche, in Bezug zur Bodenfeuchte mit deren Ableitung – hier also die Evapotranspiration ET . GleichermäÙen kann man nun auch die Ableitung einer Variablen der Atmosphäre in Bezug zum Fluss bestimmen. Als Beispiel wählen wir die sogenannte Labilitätsenergie, welche die für Konvektion zur Verfügung stehende potentielle Energie beschreibt, weshalb sie auf Englisch Convective Available Potential Energy ($CAPE$) heißt. Damit bekommt man ein einfaches KopplungsmaÙ zwischen all diesen Variablen, das folgendermaÙen formuliert werden kann:

$$TLCI = \sigma(q_{l,s}) \frac{dET}{dq_{l,s}} \frac{dCAPE}{dET}$$

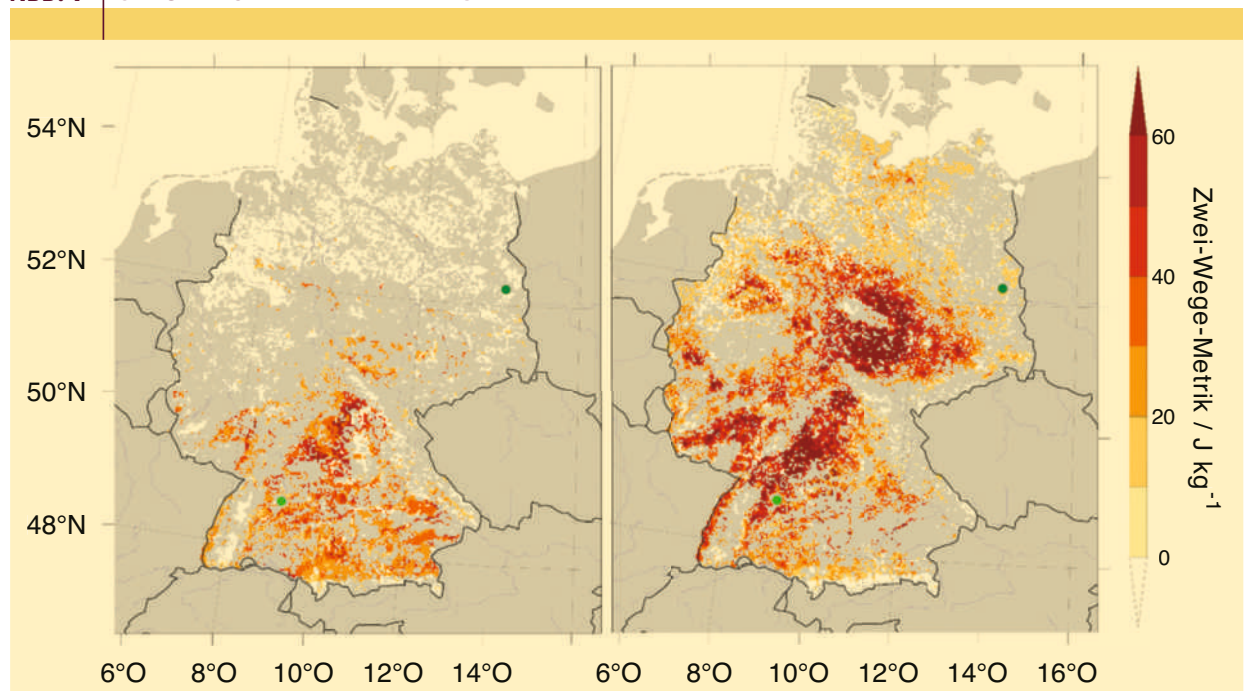
Wenn solche Daten über eine Region ermittelt werden, lassen sich damit „Hotspots“ der L-A-Kopplung zwischen verschiedenen Prozessen in der L-A-Rückkopplungskette aufspüren. Solche Metriken können natürlich auch aus Modellsimulationen extrahiert und zum Beispiel für regionale Klimaprojektionen verwendet werden, um die Trends der L-A-Kopplung in der Zukunft aufzudecken. Durch Sensitivitätsstudien ist es ferner möglich, die Bedeutung der Landoberfläche für das regionale Klima oder den Einfluss von dessen Änderung, zum Beispiel durch Wiederaufforstung, zu untersuchen. Ein Beispiel zeigt die Abbildung 7. Die Ergebnisse demonstrieren, dass die Sensitivitäten sich deutlich ändern, wenn ein

genaueres L-A-Modell (rechtes Bild) verwendet wird [16]. Das motiviert deutlich eine genauere Darstellung der Vegetation in Wettervorhersage- und Klimamodellen.

Mit der Zwei-Zweige-Metrik ist es allerdings nicht möglich, die Kopplungsstärken während bestimmter Tage zu bestimmen – oder den Verlauf der Kopplung über einen Tag (Tagesgang). Eine Darstellung, mit der man diesen Tagesgang beschreiben kann, ist das Mischungsdiagramm [17]. Es stellt die tägliche Ko-Entwicklung des fühlbaren Wärmeinhalts durch die potentielle Temperatur θ und der latenten Wärme über der Luftfeuchtigkeit $q_{wv, Luft}$ dar, letztere wird dazu in einer Höhe von 2 m über dem Boden oder der Vegetation ermittelt. Durch Schließung der Energie- und Wasserbilanz am gewählten Standort können damit die Beiträge der Oberflächenflüsse und der Entrainment-Flüsse zur Änderung der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit sowie der Anteil der Advektion herausgearbeitet werden. Das Mischungsdiagramm ist ein sehr leistungsfähiges Werkzeug, um die Kopplung der Flüsse am Boden an die Entwicklung der atmosphärischen Grenzschicht zu erforschen. Umgekehrt lässt sich damit die Qualität von Modellsimulationen anhand der Beobachtungen effizient ermitteln.

Alle diese Metriken sind Ansätze, für einen limitierten Satz von Variablen deren Beziehungen und Sensitivitäten untereinander auf möglichst instruktive Art und Weise darzustellen. Sie erlauben aber im Allgemeinen

ABB. 7 | SIMULATION EINER ZWEI-WEGE-METRIK



Linkes Bild: Simulation der Zwei-Wege-Metrik (TLCI) mit einem Standard-Wettervorhersage- und Klima-Modell (WRF-NOAHMP) von April bis August 2005. Rechtes Bild: Simulation des TLCI über den gleichen Zeitraum, aber nun unter Verwendung eines dynamischen Vegetationsmodells. Die Verstärkung der Simulation der Kopplungsstärke durch das realistischere Modell (rechte Seite) ist evident [16].

nur begrenzte Einblicke in den durch die systemische Ko-Entwicklung aufgespannten multidimensionalen Phasenraum der Wechselwirkungen. Um das Verständnis der Zusammenhänge zu vertiefen und allgemeinere Beziehungen zu finden, ist es notwendig, komplexere Ansätze zu verwenden. Dazu bietet sich tiefes Maschinenlernen an, da hier viele Variablen gleichzeitig betrachtet und analysiert werden können. Vielversprechende Beispiele finden sich in [18-20]. Hier steckt die Entwicklung allerdings noch in den Kinderschuhen, das Potenzial des tiefen Maschinenlernens muss erst weiter erkundet werden.

Ausblick

Die Qualität von Wettervorhersagen, saisonalen Simulationen und Klimaprojektionen hängt entscheidend von der Darstellung von Land-Atmosphäre-(L-A)-Rückkopplungen ab. Diese Rückkopplungen sind das Ergebnis eines hochkomplexen Netzwerks von Prozessen und Variablen, die mit dem Austausch von Impuls, Energie und Masse im L-A-System zusammenhängen. Wie wir aufzeigen konnten, gibt es noch erhebliche Wissenslücken, die möglichst schnell geschlossen werden sollten, um beispielsweise fundierte Klimaanpassungsstrategien auf Basis von akkuraten Prognosen zu ermöglichen. Solch eine fundamentale Systemforschung erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Atmosphären-, Agrar- und Bodenwissenschaften, der Biogeophysik, Hydrologie und Neuroinformatik. Dazu gehören

- die Erweiterung der gegenwärtigen Beobachtungssysteme und der Observatorien wie das LAFO der Universität Hohenheim zur gleichzeitigen Messung aller relevanten Variablen über beide Zweige der L-A-Rückkopplungen,
- die Verbesserung des Verständnisses von Prozessen wie dem Entrainment,
- Simulationen mit L-A-Systemmodellen bis zu den turbulenzlerlaubenden Skalen (10-100 m) und
- die Anwendung des tiefen Maschinenlernens zur Entwicklung genauerer Prozessbeschreibungen, zur Integration in L-A-Systeme der nächsten Generation und zur Untersuchung des multidimensionalen Phasenraums.

Beispiele für die Realisation dieser neuen Forschungsansätze ist die neue DFG-Forschungsgruppe 5639 „Land-Atmosphäre Feedback Initiative (LAFI)“ (siehe „Internet“). Volker Wulfmeyer ist Sprecher dieser Forschungsgruppe, und die zentralen Ziele beschäftigen sich mit vielen Prozessen, die in diesem Artikel diskutiert werden. Dazu gehören die Aufteilung der Flüsse und die Effekte der Heterogenität der Landoberfläche, die Evapotranspiration und das Entrainment. Wulfmeyer und sein Team sind auch an einer Vielzahl von Forschungsprojekten des GLASS Panel beteiligt. Es ist zu

INTERNET

Forschungsgruppe 5639 „Land-Atmosphäre Feedback Initiative (LAFI)“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft
<https://www.lafi-dfg.de>

World Climate Research Programme (WRCP)
<https://www.wcrp-climate.org>

Global Energy and Water Exchanges (GEWEX)
<https://www.gewex.org>

Global Land Atmospheric System Study (GLASS)
<https://www.gewex.org/panels/global-landatmosphere-system-study-panel>

Integrated Carbon Observation System (ICOS)
<https://www.icos-cp.eu>

Critical Zone Observatories (CZOs)
<https://czo-archive.criticalzone.org>

National Ecological Observatory Network (NEON)
<https://www.neonscience.org>

Ameriflux
<https://ameriflux.lbl.gov>

Fluxnet
<https://fluxnet.org>

GEWEX Land-Atmosphäre Feedback Observatories (GLAFOs)
<https://www.gewex.org/panels/global-landatmosphere-system-study-panel/glass-projects>

GLAFO-Prototyp an der Universität Hohenheim
<https://lafo.uni-hohenheim.de/en>

erwarten, dass deren Ergebnisse zu einer Verbesserung von Simulationen und Vorhersagen des L-A-Systems insbesondere zur Jahreszeitenvorhersage führen werden, was gerade in Bezug auf die Auswirkungen von Extremereignissen wertvoll sein wird.

Zusammenfassung

Das System Land-Atmosphäre umfasst den Boden, die Landbedeckung und die untere Troposphäre. Die komplexen Prozesse in diesem System sind gekoppelt über den Austausch von Impuls, Energie und Masse. Unter anderem spielt der Pflanzenbewuchs eine zentrale Rolle. Daher ist ein tiefgreifendes Verständnis dieses Systems fundamental für die Genauigkeit von Wettervorhersagen, mittelfristige bis subsaisonale Vorhersagen und Klimaprognosen. Dazu gehört auch die Vorhersage von Extremereignissen wie Dürren.

Stichwörter

System Land-Atmosphäre, atmosphärische Flüsse, Entrainment, Feedback-Metrik, extreme Ereignisse.

Danksagung

Das Institut für Bodenkunde und Standortslehre mit den Mitarbeitern T. Streck, J. Ingwersen und S. Abbas trug zu den Messungen und Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 3 bei. Das Fernerkundungsteam des Instituts für Physik und Meteorologie (IPM), A. Behrendt und D. Lange, führte die Messungen durch und trug zu den Auswertungen bei, die in den Abbildungen 4 und 5 gezeigt werden. Wir danken Dr. V. Lehmann und Dr. F. Laueremann vom Deutschen Wetterdienst (DWD) für die Zusammenarbeit bei den Messungen zu Abb. 4 am Meteorologischen Observatorium-Richard Aßmann Observatorium (MOL-RAO) in Lindenberg. H.-S. Bauer vom IPM führte die Modellierung durch und erzeugte die Abbildung 6. K. Warrach-Sagi stellte die Abbildung 7 aus einer

weiteren Modellsimulation und Publikation des IPM zur Verfügung. Wir danken allen Projektleitern der DFG FOR 5639 LAFI, die zum Erfolg dieses Forschungsteams beigetragen und die an der Abbildung 1 mitgearbeitet haben. Viele wissenschaftliche Betrachtungen, die in diesen Artikel eingegangen sind, sind inspiriert durch Diskussionen im GLASS Panel und dieser neuen FOR.

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] V. Humphrey et al., *Nature* **2021**, 592, 65.
- [2] A. Bastos et al., *Sci. Adv.* **2020**, 6(24), eaba2724.
- [3] A. M. Ukkola et al., *Geophys. Res. Lett.* **2018**, 45, 9003.
- [4] P. A. Dirmeyer et al., *AGU Advances* **2021**, 2, e2020AV000283.
- [5] O. Branch, V. A. Wulfmeyer, *P. Natl. Acad. Sci.* **2019**, 116(38), 18841.
- [6] V. A. Wulfmeyer et al., *GEWEX Quarterly Newsletter* **2020**, 30(1), 6.
- [7] F. Späth et al., *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **2023**, 12, 25.
- [8] M. Mauder, T. Foken, J. Cuxart, *Bound.-Lay. Meteorol.* **2020**, 177, 395.
- [9] D. Lange, A. Behrendt, V. Wulfmeyer, *Geophys. Res. Lett.* **2019**, 46(14), 844.
- [10] V. A. Wulfmeyer, A. Behrendt, in: *Springer Handbook of Atmospheric Measurements* (Hrsg.: T. Foken), Springer Nature, Cham (Schweiz) 2021, 719.
- [11] A. Behrendt et al., *Atmos. Meas. Tech.* **2020**, 13, 3221.
- [12] T. Foken et al., in: *Springer Handbook of Atmospheric Measurements* (Hrsg.: T. Foken), Springer Nature, Cham (Schweiz) 2021, 3.
- [13] V. Bauer et al., *Tellus A: Dyn. Meteorol. Oceanogr.* **2020**, 72, 1.
- [14] J. A. Santanello et al., *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **2018**, 99, 1253.
- [15] P. A. Dirmeyer et al., *J. Hydrometeorol.* **2018**, 19(2), 375.
- [16] K. Warrach-Sagi et al., *J. Geophys. Res.-Atmos.* **2022**, 127(14), e2022JD036518.
- [17] J. A. Santanello, C.D. Peters-Lidard, S.V. Kumar, *J. Hydrometeorol.* **2011**, 12, 766.
- [18] T. Nguyen et al., *arXiv 2023 preprint*, arXiv:2301.10343.
- [19] V. A. Wulfmeyer et al., *Bound.-Lay. Meteorol.* **2023**, 186(2), 337.
- [20] T. Tesch et al., *Geosci. Model Dev.* **2023**, 16, 2149.
- [21] M. B. EK, A. A. M. Holtslag, *J. Hydrometeorol.* **2004**, 5, 86.
- [22] M. Helbig et al., *Agric. For. Meteorol.* **2021**, 307, 108509.

Zusatzmaterial

Den Zusatztext „Überblick über die Messgeräte und Messvariablen von LAFO“ finden Sie unter „Supporting Information“ auf <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.202501716/supinfo>.



Die Autoren



Volker Wulfmeyer promovierte und habilitierte sich am Max-Planck-Institut für Meteorologie im Fachgebiet Geowissenschaften. Nach einem mehrjährigen Forschungsaufenthalt am National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, USA, ist er seit 2001 Direktor und Lehrstuhlinhaber am Institut für Physik und Meteorologie (IPM) der Universität Hohenheim (UHOH) in Stuttgart. Er ist Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften.



Lisa Jach studierte Umweltwissenschaften an den Universitäten Hohenheim und Kopenhagen. Sie promovierte 2023 am Institut für Physik und Meteorologie der Universität Hohenheim und forscht seitdem als PostDoc an der Universität Hohenheim zur Quantifizierung räumlich-zeitlicher Variabilität der Rückkopplungsprozesse im regionalen Land-Atmosphäre System.



Oliver Branch ist seit 2014 Wissenschaftler am IPM und seit Koordinator von LAFO. Seine Expertise umfasst mesoskalige Simulationen und Grobstruktursimulationen mit dem WRF-NOAHMP-Modellsystem, mikrometeorologische Messungen und die Anwendungen von Fernerkundungssystemen in ariden und semi-ariden Gebieten. Ferner forscht er an der Bio-Geoengineering Methoden zur Erzeugung und Verstärkung der Wolkenbildung und des Niederschlags.



Marcus Breil promovierte am Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Seit 2022 leitet er die Nachwuchsgruppe „Rückkopplungsprozesse im Erdsystem“ am Institut für Physik und Meteorologie (IPM) der Universität Hohenheim (UHOH) in Stuttgart.

Anschrift

Prof. Dr. Volker Wulfmeyer, Institut für Physik und Meteorologie (IPM), Universität Hohenheim (UHOH), Garbenstraße 30, 70599 Stuttgart. volker.wulfmeyer@uni-hohenheim.de