



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



CAWR

Center for Advanced Water Research

TU-Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Fachrichtung Hydrowissenschaften, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur für Meteorologie

# Verdunstung freier Wasserflächen

## *Ergebnisse der Forschungsprojekte TREGATA und MEDIWA*

gefördert durch:



Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

**Kontakt:**

Dr. Uwe Spank

Technische Universität Dresden

Fakultät Umweltwissenschaften

Professur für Meteorologie

PF 1117

01735 Tharandt

Tel.: +49 351 463-31298

Fax : +49 351 463-31302

E-Mail: [Uwe.Spank@tu-dresden.de](mailto:Uwe.Spank@tu-dresden.de)

**Definition:** Der Begriff Verdunstung bezeichnet den sich unterhalb des Siedepunktes vollziehenden Übergang des Wassers vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand - zum Wasserdampf. Die zum Verdunsten benötigte Wärmeenergie wird dabei der Flüssigkeit und der Umgebung entzogen, was zu Abkühlung führt (Verdunstungskälte).

[Wetter- und Klimalexikon des DWD:

<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/V/Verdunstung.html>, 06.06.2023]

- **Änderung des Aggregatzustands**
- **Energieumwandlung (thermische Energie**
  - **latente Energie)**

## Wasserbilanz: $P = R + ET + \Delta S$

- P... Niederschlag (Precipitation)
- R... Abfluss (Runoff)
- ET... Verdunstung (Evapotranspiration)
- $\Delta S$ ... Änderung des in der hydrologischen Einheit gespeicherten Wassers (Storage Change)

$$LE = ET \cdot L$$

Wasser:  $L_v = 2.5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$   
Eis:  $L_s = 2.8 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$

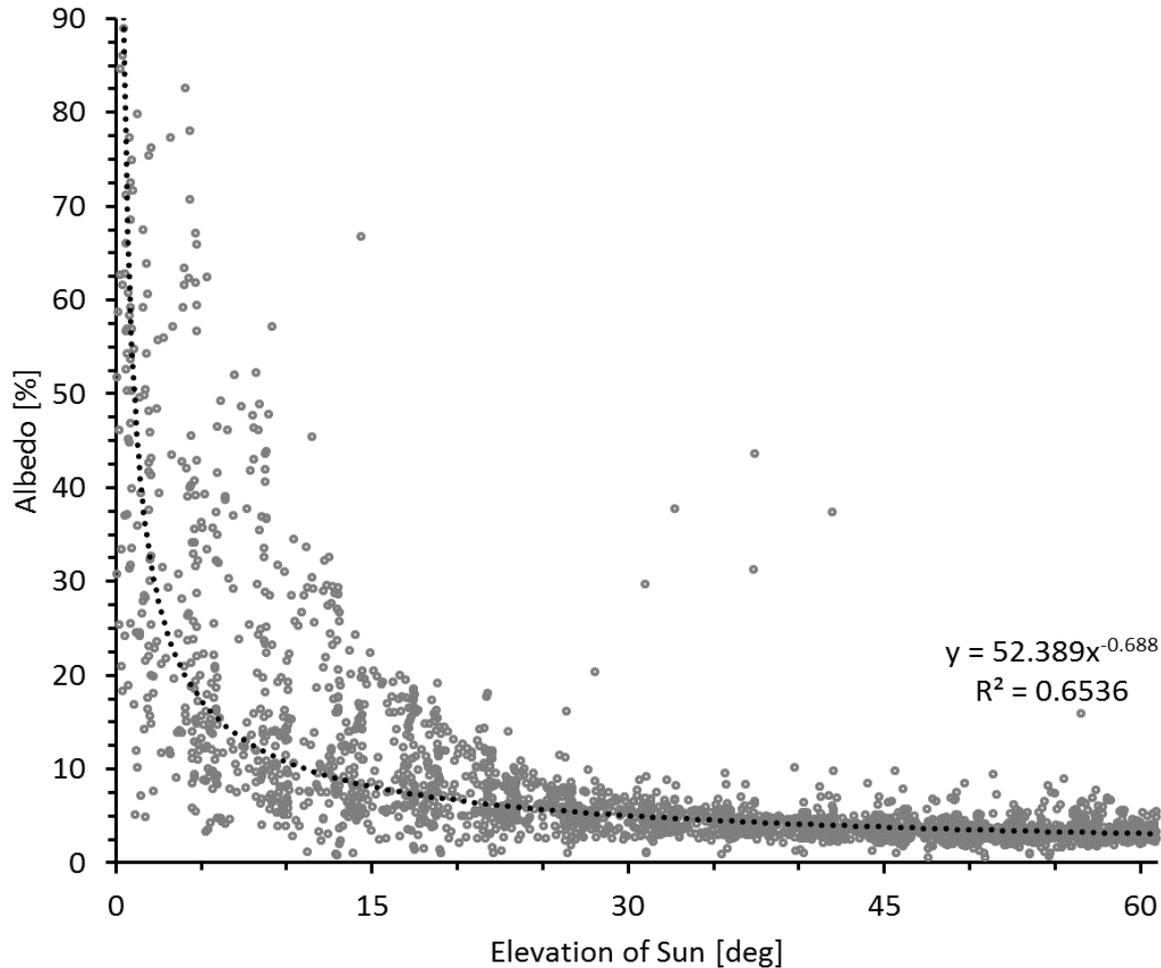
## Energiebilanz: $R_n = H + LE + \Delta J$

- LE... latenter Wärmefluss = Energieäquivalent der Verdunstung (Latent Heat Flux)
- H... Sensibler Wärmestrom (Sensible Heat Flux)
- $R_n$ ... Nettostrahlung (Net Radiation)
- $\Delta J$ ... Änderung der in der hydrologischen Einheit gespeicherten Wärme

## Strahlungsbilanz: $R_N = (1-\alpha) R_S - R_T + R_A$

- $R_N$ ... Nettostrahlung (Net Radiation)
- $R_S$ ... direkte und diffuse solare Einstrahlung = kurzwellige Einstrahlung
- $\alpha$ ... Albedo (Reflexionsvermögen für solare Strahlung)  $\rightarrow$  *Nadelwald  $\alpha \approx 0.10$ ; Laubwald  $\alpha \approx 0.17$ ; Gras  $\approx 0.22$ ; Wasser  $\alpha \approx 0.05$  (hoher Sonnenstand) bis  $0.9$  (flacher Sonnenstand); Schnee  $\alpha \approx 0.9$ ; Boden  $\alpha \approx 0.05$  bis  $0.45$*
- $R_T$ ... Terrestrisch emittierte Strahlung = langwellige Abstrahlung der Oberfläche
- $R_A$ ... Atmosphärische Gegenstrahlung = langwellige Emission der Atmosphäre

indirekte Kopplung



Albedo Reflexionsvermögen für solare Strahlung (Albedo) der Wasseroberfläche in Abhängigkeit vom Sonnenstand; Datengrundlage: 30Minuten-Messwerte der solaren Einstrahlung und der reflektierten solaren Strahlung über der Rappbode-Talsperre im Sommerhalbjahr 2017)

**(1) Die Verdunstung wird durch das Energiedargebot bestimmt**

→ energetisches Maximum durch  $R_N$

**(2) Wasserdargebot**

→ ☺ Wo kein Wasser da ist kann kein Wasser verdunsten ☺

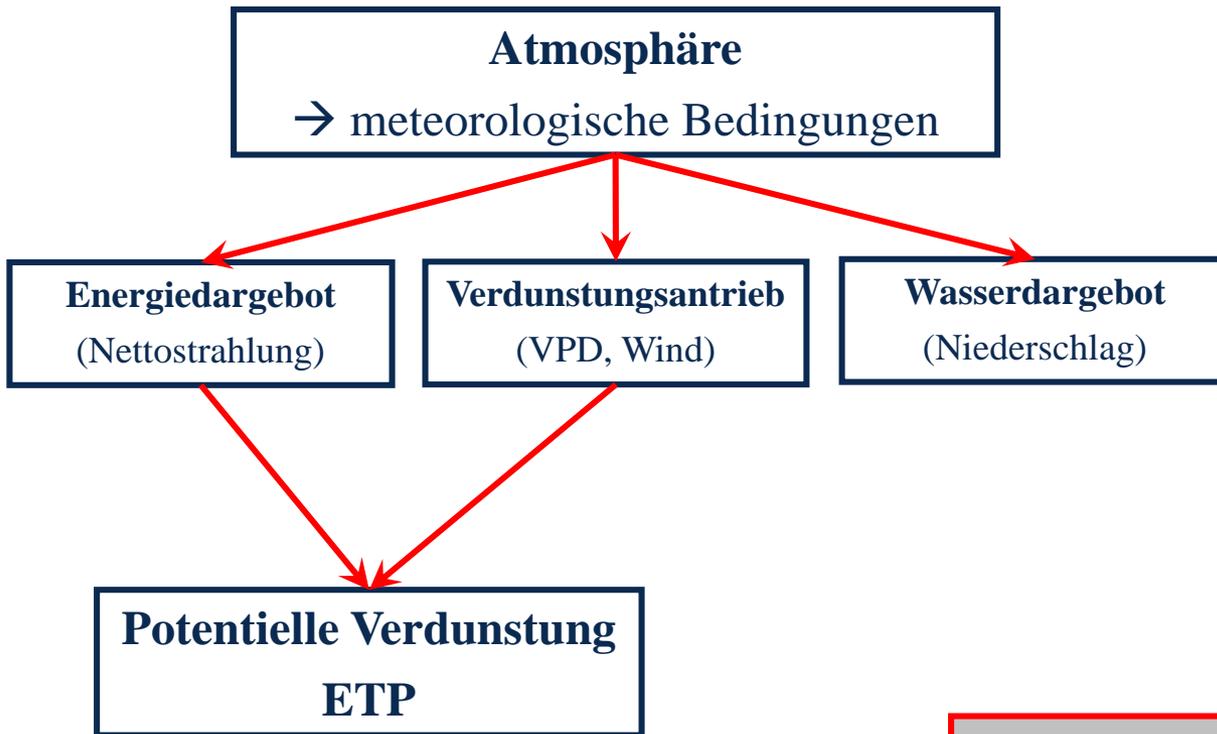
→ Niederschlag und Standortparameter z.B. Vegetation und Bodenstruktur

**(3) Sättigungsdampfdruckdefizit (VPD, vapor pressure deficit)**

→ Unterhalb des Siedepunkts kann nur eine begrenzte Menge Wasserdampf (vapor) in der Luft (Atmosphäre) gelöst sein

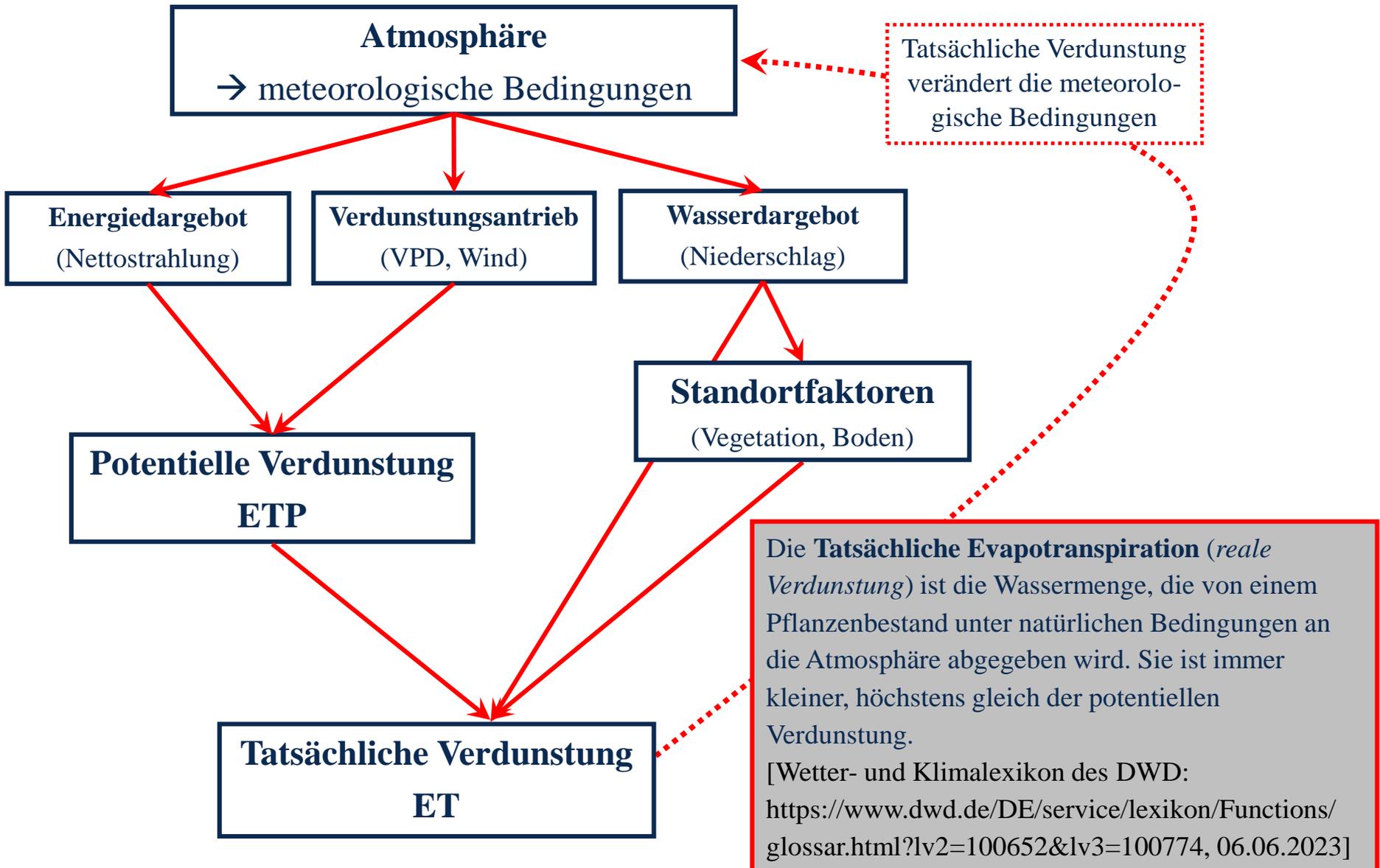
→ „Bestreben der Atmosphäre Wasserdampf aufzunehmen“

**(4) Wind ( $u$ ) → Abtransport des verdunsteten Wassers**



Die **potentielle Evapotranspiration** (*potentielle Verdunstung*) ist die Wassermenge, die von einem Pflanzenbestand bei ausreichender Nährstoff- und Wasserversorgung in Form von Wasserdampf an die Atmosphäre abgegeben wird. **Sie stellt die maximal mögliche Verdunstung dar.**

[Wetter- und Klimalexikon des DWD:  
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100652&lv3=100772>, 06.06.2023]



Wetter- und Klimalexikon des DWD: Die potentielle Evapotranspiration (*Verdunstung*) ist die Wassermenge, die von einem Pflanzenbestand bei ausreichender Nährstoff- und Wasserversorgung in Form von Wasserdampf an die Atmosphäre abgegeben wird. **Sie stellt die maximal mögliche Verdunstung dar.**

[<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100652&lv3=100772>, 06.06.2023]

– *Potentielle Verdunstung*  $EP_0$  in  $\text{mm d}^{-1}$ , definiert als die Wassermenge, die pro Flächen- und Zeiteinheit von einer idealisierten, ausgedehnten freien Wasseroberfläche unter den bestehenden atmosphärischen Bedingungen verdunstet.

Dyck, S., Peschke, G. (1995):  
Grundlagen der Hydrologie, 3. Stark  
bearb. Auflage, Verlag Bauwesen,  
S.181

*Potential Evaporation  $E_0$  (in Millimeters per Day)*. Potential evaporation is here defined as the quantity of water evaporated per unit area, per unit time from an idealized, extensive free water surface under existing atmospheric conditions. This is a conceptual entity which measures the meteorological control on evaporation from an open water surface.

Maidment, David R. (1993) Handbook of Hydrology.  
Mcgraw-Hill Professional, S.4.14-4.15

Wetter- und Klimalexikon des DWD: Die potentielle Evapotranspiration (*Verdunstung*) ist die Wassermenge, die von einem

Pflanzen

Wasserdampf

abgegeben

dar.

[<https://www.dwd.de/lexikon/verdunstung>]

## Potential Evapotranspiration

M.B. Kirkham, in

*Principles of Soil and Plant Water Relations (Second Edition)*, 2014

### 28.1 Definition of Potential Evapotranspiration

Rosenberg says that potential evapotranspiration (abbreviated as ETP by him, but as PET by most others) is “the evaporation from an extended surface of [a] short green crop which fully shades the ground, exerts little or negligible resistance to the flow of water, and is always well supplied with water. **Potential evapotranspiration cannot exceed free water evaporation under the same weather conditions”.**

*Potential Evaporation  $E_p$  (in millimeters per Day).* Potential evaporation is here defined as the quantity of water evaporated per unit area, per unit time from an idealized, extensive free water surface under existing atmospheric conditions. This is a conceptual entity which measures the meteorological control on evaporation from an open water surface.

Maidment, David R. (1993) Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Professional, S.4.14-4.15

atmosphäre  
**Verdunstung**

[2023]

- Potentielle  
und Zeite  
stehenden

, die pro Flächen-  
fläche unter den be-

. (1995):  
rologie, 3. Stark  
ag Bauwesen,

# *Wie groß ist die Verdunstung von Gewässern wirklich ?*

**Wie kann man die Verdunstung von Gewässern messen?**

→ *Beispiele und Messwerte aus den Forschungsprojekten TREGATA und MEDIWA*

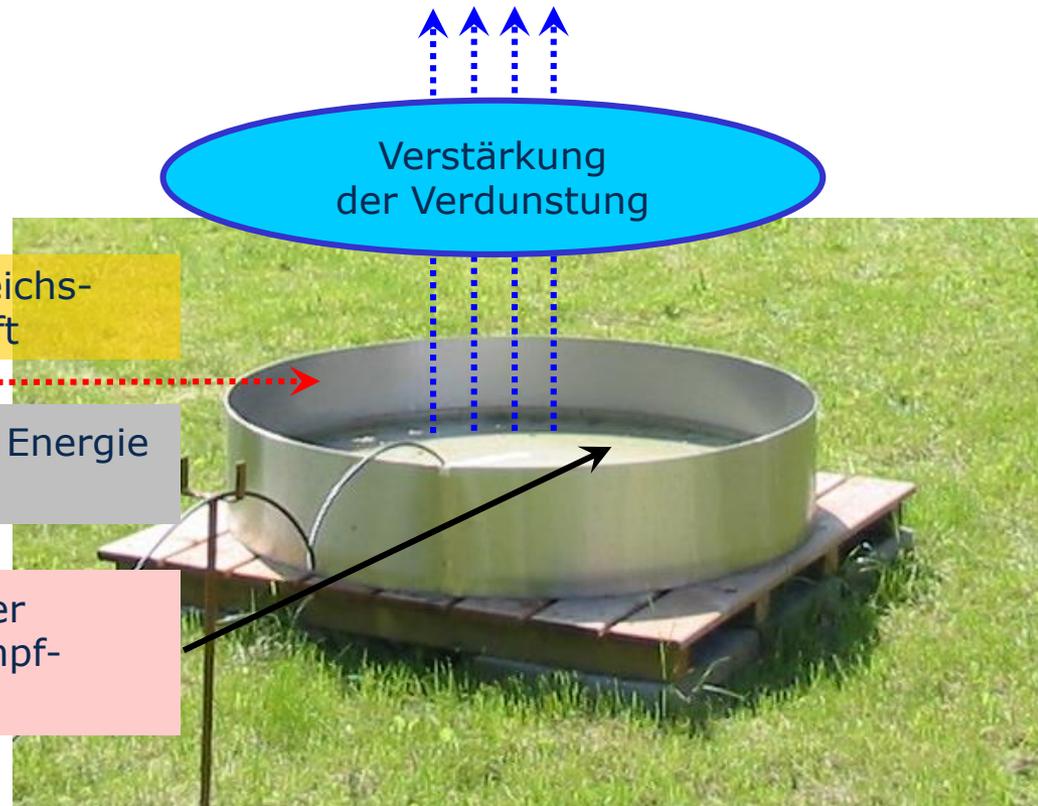


Class-A Pan am Tharandter Messfeld

→ horizontaler Zustrom von vergleichsweise trockener und warmer Luft

→ zusätzliche Zufuhr von Wärme/ Energie aus der Umgebung (Advektion)

→ starke Überwärmung des Wasser  
→ Erhöhung des Sättigungsdampfdruckdefizits (VPD)



Methodisch bedingte Verfälschung der tatsächlichen Verdunstung

👍 einfaches direktes Messverfahren, quasi-standardisiert (Class-A Pan), im international sehr verbreitet

👎 **deutliche bis extreme Überschätzung der tatsächlichen Verdunstung**

➔ **Repräsentativität für Wasserflächen fraglich → wurde aber zur Parametrisierung verbreiteter Verdunstungsmodelle genutzt**

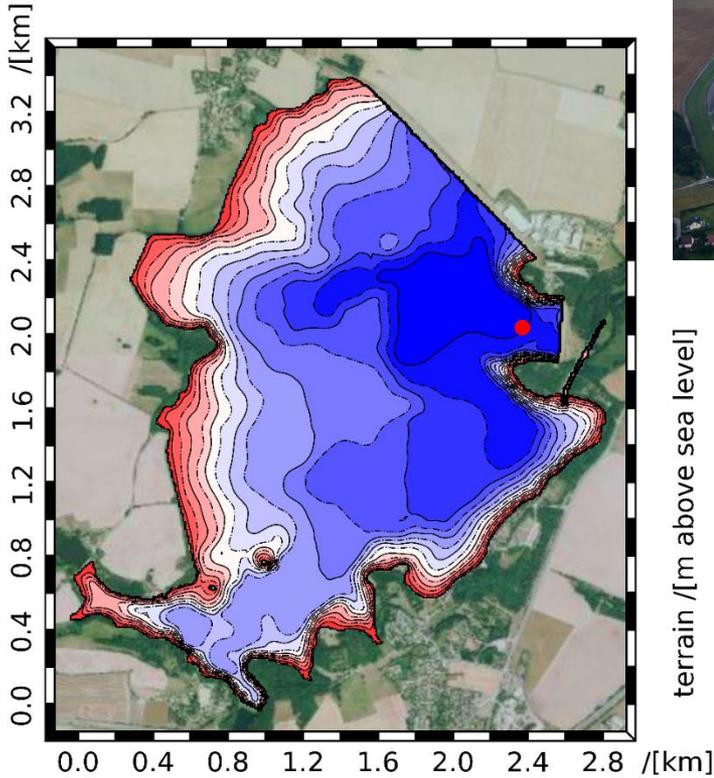
## 2.2 Schwimmende oder im Gewässer festinstallierte Lysimeter



Schwimmend installiertes Lysimeter auf der Talsperre Bautzen im Rahmen des DFG-Projekts MEDIWA (2022)

- 👍 bei korrekter Installation Überwindung der Advektion, vergleichsweise einfache und preiswerte Installation
- 👎 Entkopplung vom Wasserkörper des Gewässers → Wassertemperatur und Wärmebilanz oftmals falsch abgebildet, Verfälschung der Messwerte durch zusätzlichen Wassereintrag aus Wellenschlag und Gischt, durch Trägerelemente verursachte Modifikationen des Wind- und Turbulenzfelds
- ➔ **in Verbindung mit Klimastation → sinnvolle Option zum Monitoring von kleineren Gewässern z.B. Fischteichen**

$$ET = \Delta S + P + Q_{in} - Q_{out}$$



Luftbild Talsperre Bautzen  
 (Bildquelle: WIKIPEDIA;  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Talsperre\\_Bautzen](https://de.wikipedia.org/wiki/Talsperre_Bautzen), 16.08.2017)

Bathymetrie der Talsperre Bautzen  
 (Datenquelle: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ,  
 Department Seenforschung)

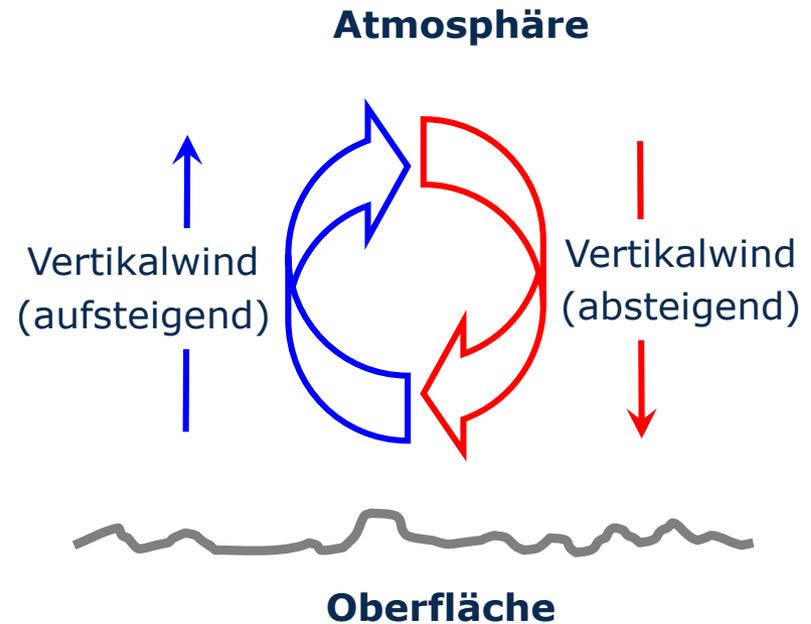
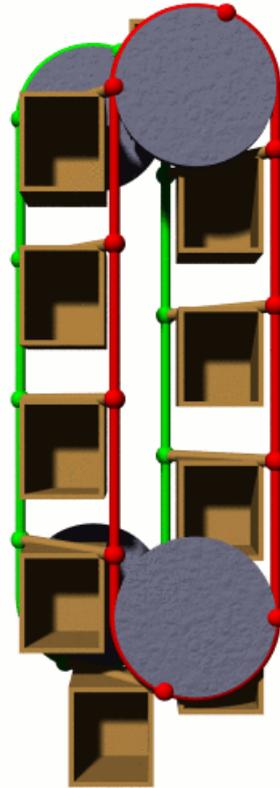
$$ET = \Delta S + P + Q_{in} - Q_{out}$$

- **Mittlere Jahresverdunstung der Wasserfläche der Talsperre Bautzen (2018-2022): ~ 875 mm**

→ gleicher Größenordnung wie gut wasserversorgte Wiesenstandorte



- 👍 Messdaten oftmals durch Gewässerunterhalter z.B. Talsperrenbetreiber vorhanden
- 👎 Nicht geeignet für Gewässer mit bedeutsamen Grundwasserzu- oder abströmen oder bedeutsamen Wassereinträgen aus nichtbeobachteten Oberflächengewässern
- 👎 Hohe Sensibilität auf Messtoleranzen → sehr genaue Messdaten von Bathymetrie, Pegel, Zufluss und Abgabe erforderlich



Bildquellen: <https://de.wikipedia.org/wiki/Paternosteraufzug>,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Lava\\_lamp](https://en.wikipedia.org/wiki/Lava_lamp)

**Vereinfachter Vergleich:** Luft ist in vielen kleinen Luftpaketen (=Eddies) unterschiedlicher Größe organisiert → aufsteigende Eddies transportieren etwas z.B. Wärme oder Wasserdampf nach oben, absinkende Eddies transportieren etwas nach unten → Vergleich mit Lavalampe oder Padernosteraufzug

## 2.4 Eddy-Kovarianz-Methode (EC- Methodik)



EC-Messanlage im Tharandter Wald zum Monitoring des Stoff- und Energieaustausch zwischen einem Buchenbestand und der Atmosphäre

- mikrometeorologische Methode auf Grundlage der Reynolds-Zerlegung und Theorie der Frozen-Turbulence
- Messung kleiner Luftwirbel = Messung des turbulenten Austausch
- hochfrequente Messung von 3D-Windgeschwindigkeit und skalaren Lufteigenschaften z.B. Temperatur, H<sub>2</sub>O-, CO<sub>2</sub>-Konzentration
- Kovarianz zwischen Fluktuation des Vertikalwinds  $w$  und skalaren Lufteigenschaft  $c$

$$F_c = k \cdot \overline{w'c'} = k \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})(c_i - \bar{c})$$

Querstrich... Mittelwert der Periode  
 k... Konvertierungsparameter

- Weitere Bearbeitungsschritte (Processing)
- ➔ **Stoff- und Energieflüsse in halbstündlicher zeitlicher Auflösung**
- ➔ **flächenhafte Messung (ca. 200m Radius) = Footprint**



Auf der Talsperre Bautzen eingesetztes EC-Messsystem zum zeitlich hochaufgelösten Monitoring des sensiblen und latenten Wärmefluss, der Verdunstung und des Kohlendioxid- und Methanaustauschs zwischen Wasseroberfläche und Atmosphäre

**Voraussetzung:** ausreichend großes Gewässer mit annähernd homogenen Bedingungen im Footprint des EC-Systems  
→ ungeeignet für kleinere Seen und Teiche

- 👍 hohe zeitliche Auflösung der Messdaten (30 Minuten)
- 👍 bei korrekter Installation verglichen mit anderen Messverfahren deutlich höhere Messgenauigkeit → Quantifizierung der Messgenauigkeit über Energiebilanz-Schließungslücke und analytische Fehlerabschätzungen möglich
- 👍 Repräsentativität der Daten über Footprint- Analysen analytisch bestimmbar Korrektheit
- 👎 technisch aufwendig und teuer
- 👎 **aufwendige Datennachbereitung**  
→ **geschultes Personal !**



Schwimmendes Messlabor mit EC-Messsystem auf der Talsperre Bautzen zur zeitlich hochaufgelösten Messung des sensiblen und latenten Wärmefluss, der Verdunstung und des Kohlendioxid- und Methanaustauschs zwischen Wasseroberfläche und Atmosphäre

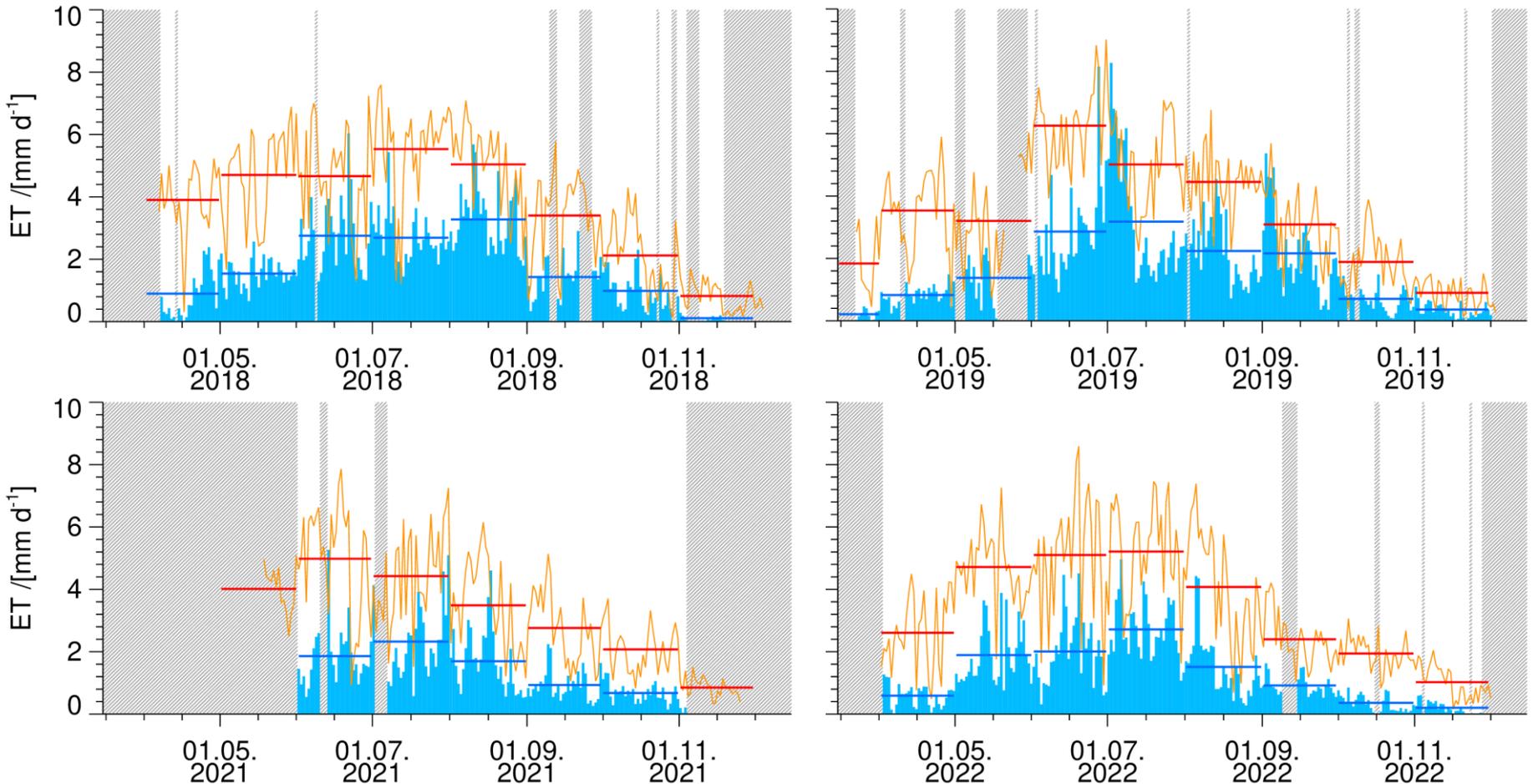


Rappbode- Talsperre im Harz (oben)

Source: André Künzelmann, UFZ; <http://www.ufz.de/index.php?de=35315>, 16.08.2017

Talsperre Bautzen (unten)

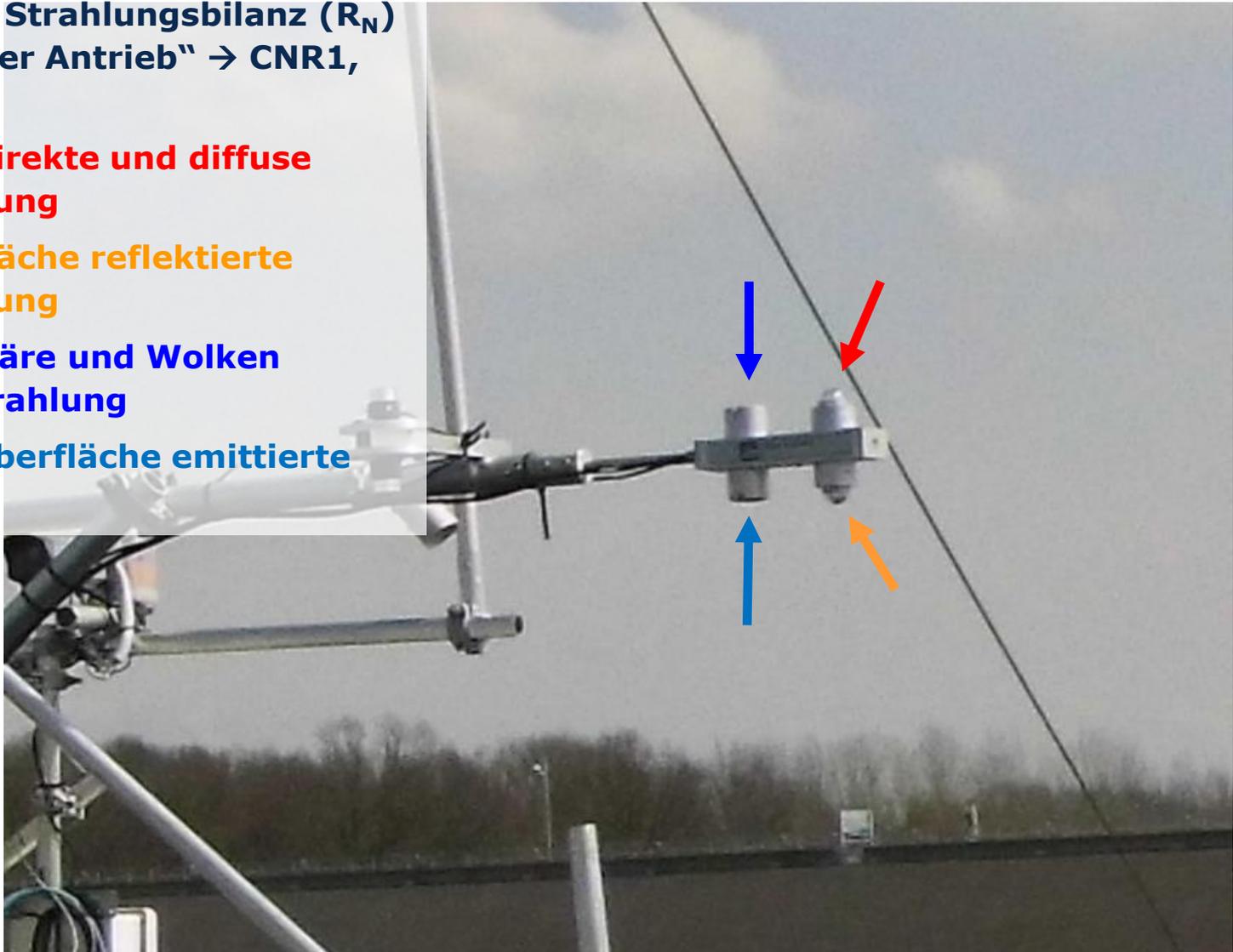
Source: WIKIPEDIA; [https://de.wikipedia.org/wiki/Talsperre\\_Bautzen](https://de.wikipedia.org/wiki/Talsperre_Bautzen), 16.08.2017



Über dem Freiwasserbereich der Talsperre Bautzen gemessene Verdunstung (**blau**) im Vergleich zu einem Wiesenstandort (FAO- Grasflächen- Referenzverdunstung, **orange**) (horizontale Linien: Monatsmittelwert, graue Schraffur: Datenlücken)

**Monitoring der Strahlungsbilanz ( $R_N$ )**  
= „energetischer Antrieb“ → CNR1,  
Kipp&Zonen

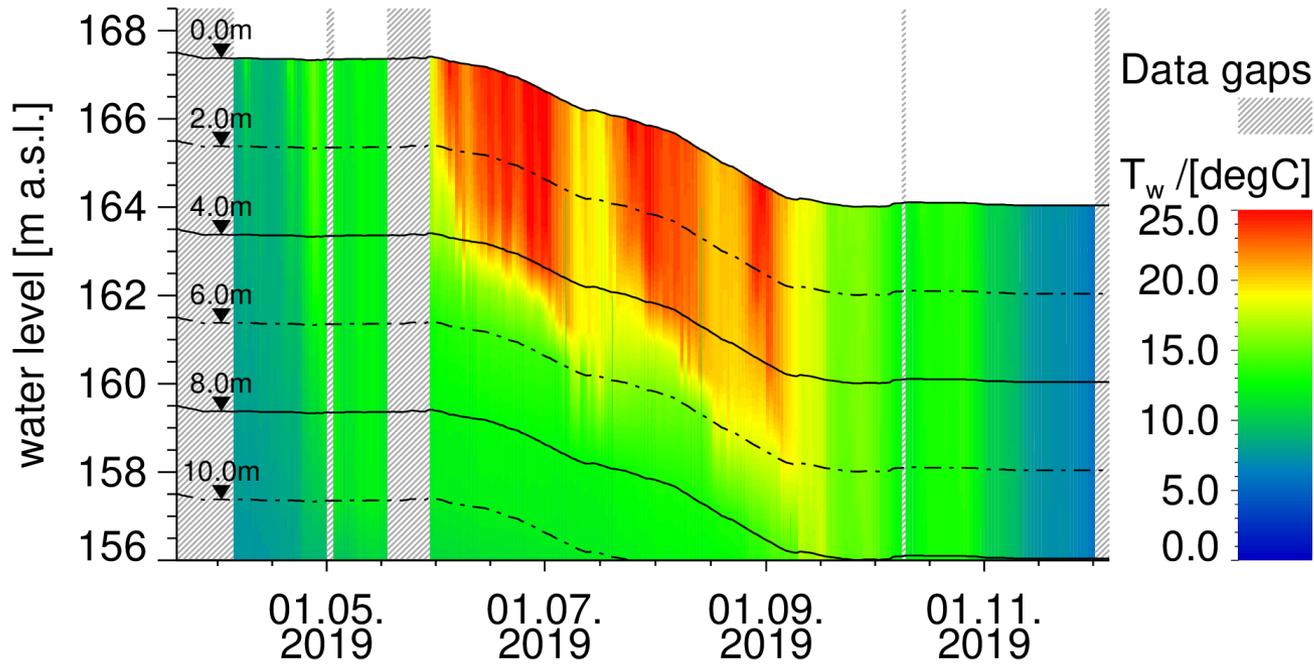
- **einfallende direkte und diffuse solare Strahlung**
- **von Wasserfläche reflektierte solare Strahlung**
- **von Atmosphäre und Wolken emittierte Strahlung**
- **von Wasseroberfläche emittierte Strahlung**



### 3.3 Messung der Wassertemperatur und der Wärmebilanz des Wasserkörpers

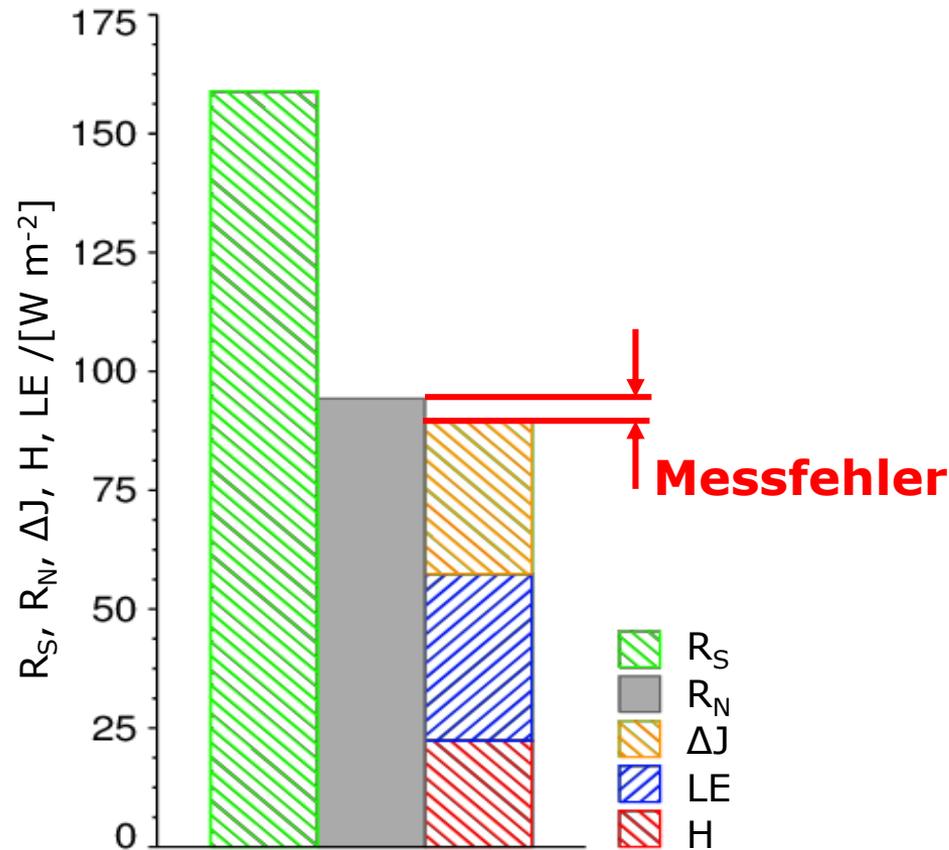


← Wassertempersensoren  
Profilstrang →



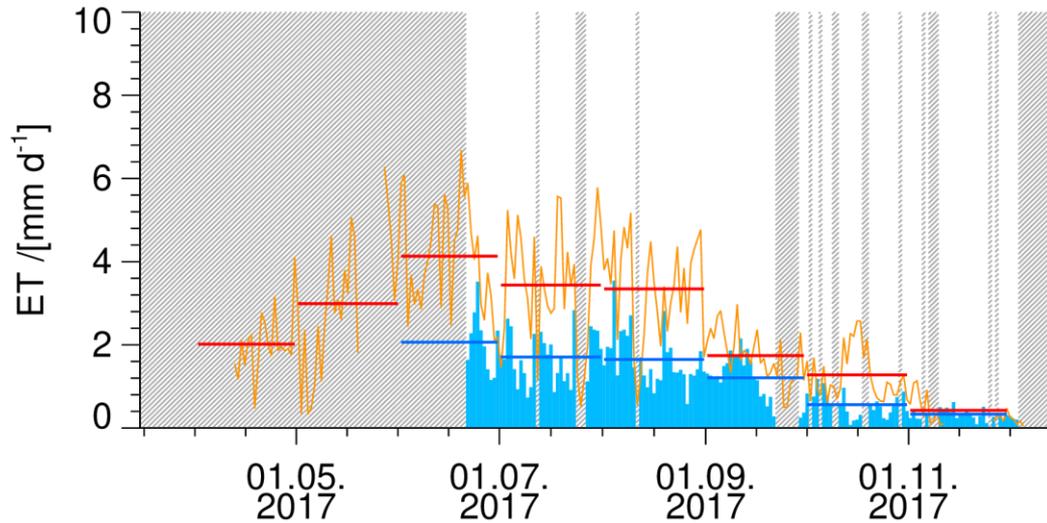
Jahreszeitliche Veränderung der Wassertemperatur (Talsperre Bautzen)

## 3.4 Analyse der gemessenen Energiebilanz und Bewertung der Messgenauigkeit



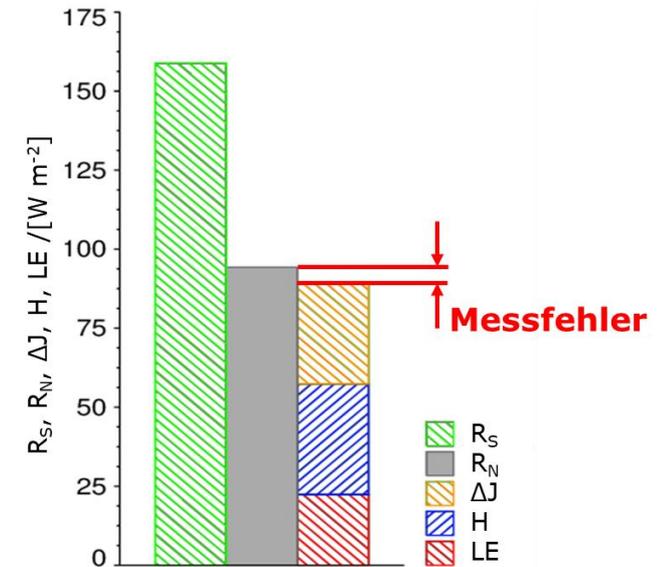
Saisonale Mittelwerte der Energiebilanzkomponenten (Nettostrahlung,  $R_N$ ; Wärmespeicheränderung im Wasserkörper,  $\Delta J$ ; sensibler Wärmefluss,  $H$ ; und latenter Wärmefluss,  $LE$ ) über dem Freiwasserbereich der Rappbode- Talsperre im Jahr 2017; zum Vergleich einfallende solare Strahlung,  $R_S$

## 3.5 Bewertung der Verdunstung über dem Freiwasserbereich der untersuchten Talsperren

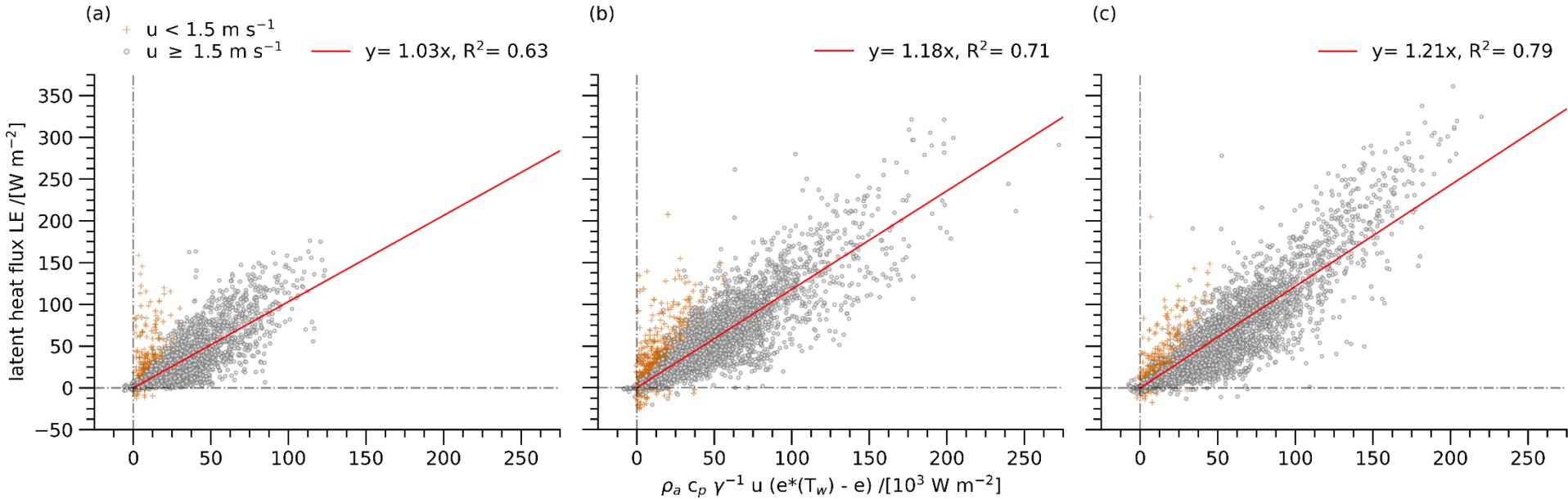


Über dem Freiwasserbereich der Rappbode- Talsperre gemessene Verdunstung (**blau**) im Vergleich zu einem Wiesenstandort (FAO- Grasflächen- Referenzverdunstung, **orange**)

horizontale Linien: Monatsmittelwert, graue Schraffur: Datenlücken



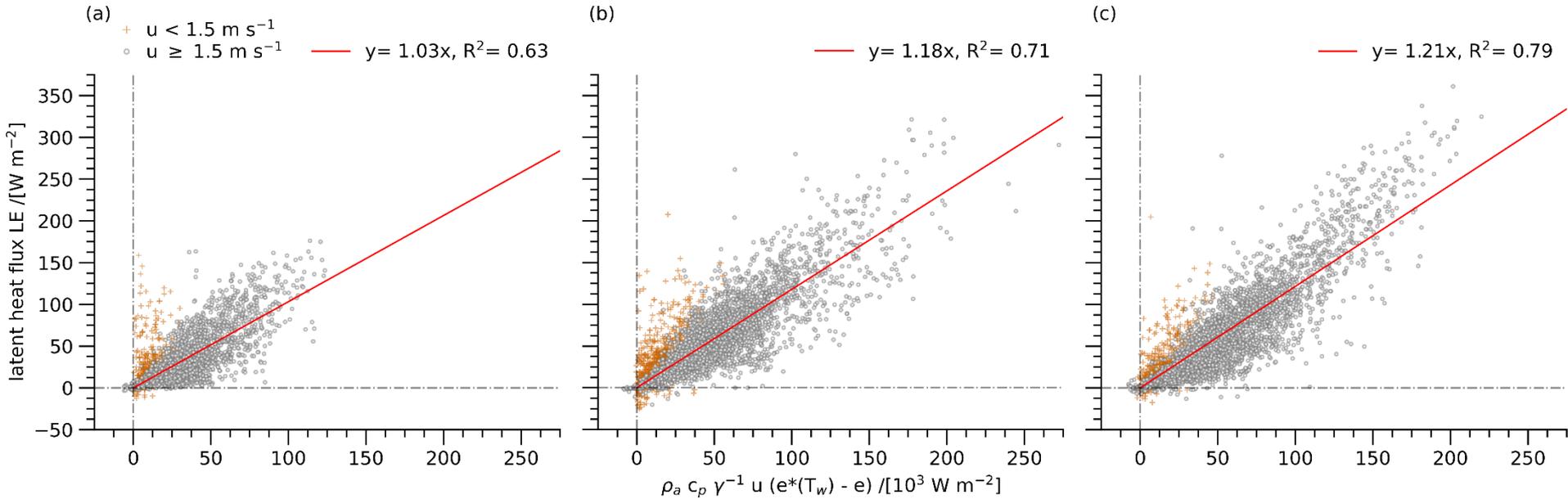
- überraschend niedrige Verdunstungsraten über dem Freiwasserbereich beider Talsperren  
→ Widerspruch zu zahlreichen Lehrbüchern
- **Messfehler können als Ursache ausgeschlossen werden!**



Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit  $u$ , Wasserdampfdefizit der Luft als Gradient zwischen Sättigungsdampfdruck  $e^*$  bei Wasseroberflächentemperatur  $T_w$  und Dampfdruck der umgebenden Luft, und latenten Wärmefluss als Energieäquivalent der Verdunstung ( $LE = L \cdot ET$ ) abgeleitet auf Grundlage von EC-Messdaten in halbstündlicher Auflösung

[ $\rho_a$ ... Luftdichte ( $\sim 1.2 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $c_p$ ... spezifische Wärmekapazität der Luft ( $\sim 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $\gamma$ ... Psychrometerkonstante ( $\sim 0.65 \text{ hPa K}^{-1}$ )]

(a) Rappbode-Talsperre (2017), Talsperre Bautzen (2018) und Talsperre Bautzen (2019)



➤ **Haupttreiber der Verdunstung sind:**

- (1) Windgeschwindigkeit ( $u$ )
- (2) Wasseroberflächentemperatur bzw. Temperatur der oberflächennahen Wasserschicht ( $T_w$ )
- (3) Luftfeuchtigkeit bzw. Wasserdampfpartialdruck der oberflächennahen Luftschicht ( $e$ )

➤ **anders als bei Landoberflächen wurde keine direkte Korrelation zu Strahlungsbilanzkomponenten gefunden**

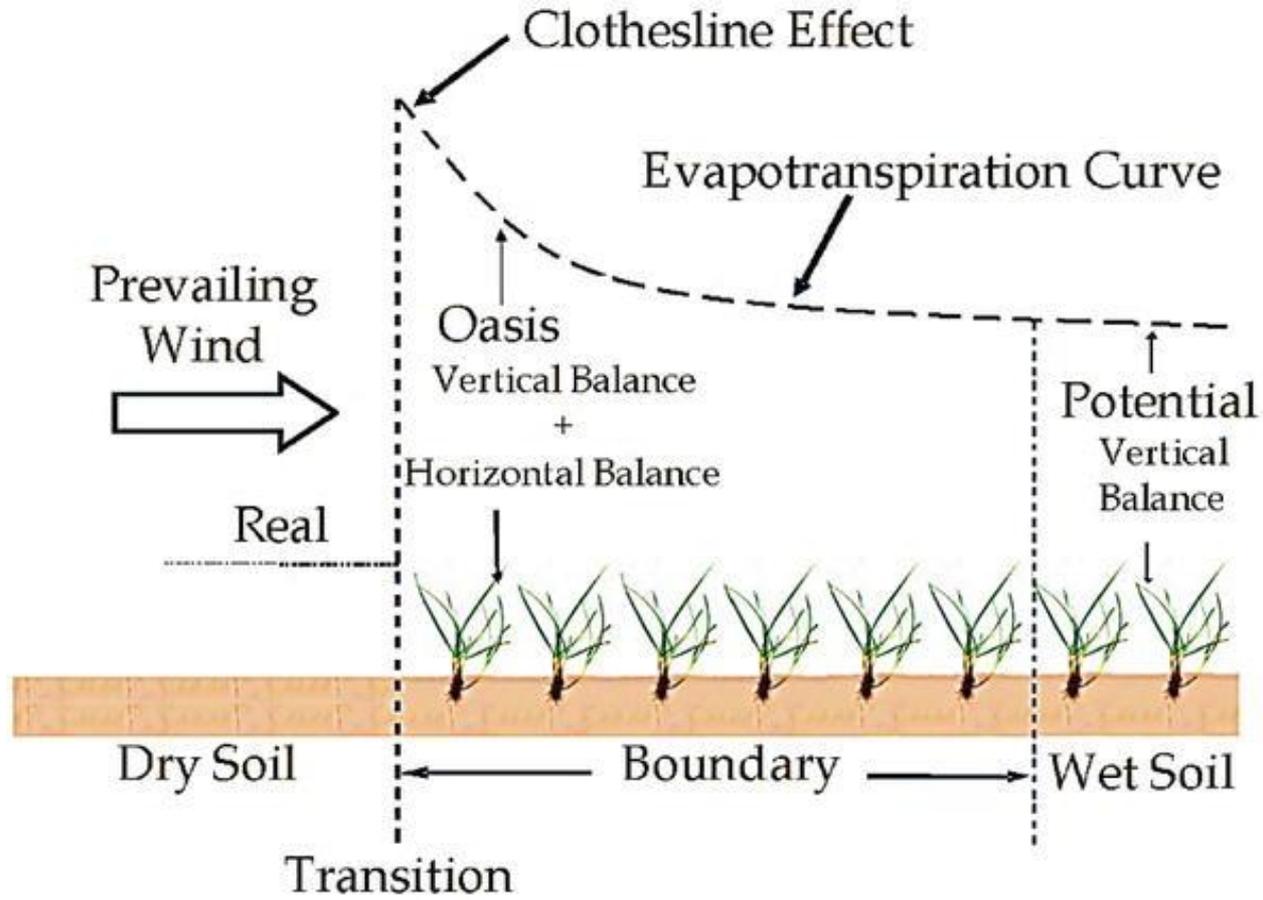
Mögliche Ursachen für Abweichungen zwischen mittels EC-Methodik und Wasserbilanzmethodik bestimmten Verdunstungsraten

- **Messfehler in der EC-Methodik scheiden als alleinige Ursache aus ! → redundante Messungen und umfassende Unsicherheitsanalysen bestätigen Messergebnisse**
- Falsche Theorie oder ungeeignete Modelle inklusive ungeeigneter Modellparametrisierungen? → Aber: Abschätzungen von ET auf Basis der Wasserbilanz **widersprechen NICHT gänzlich** der Theorie

- 
- Räumliche Heterogenität der meteorologischen und limnologischen Treibervariablen inklusive der Advektion
  - räumliche Variation der Verdunstungsraten und einer überproportionalen Bedeutung der Uferzone auf die Gesamtverdunstung eines Gewässers

## Analogie und Arbeitshypothese

*„Ein Binnengewässer verhält sich ähnlich einer Oase in der Wüste“*



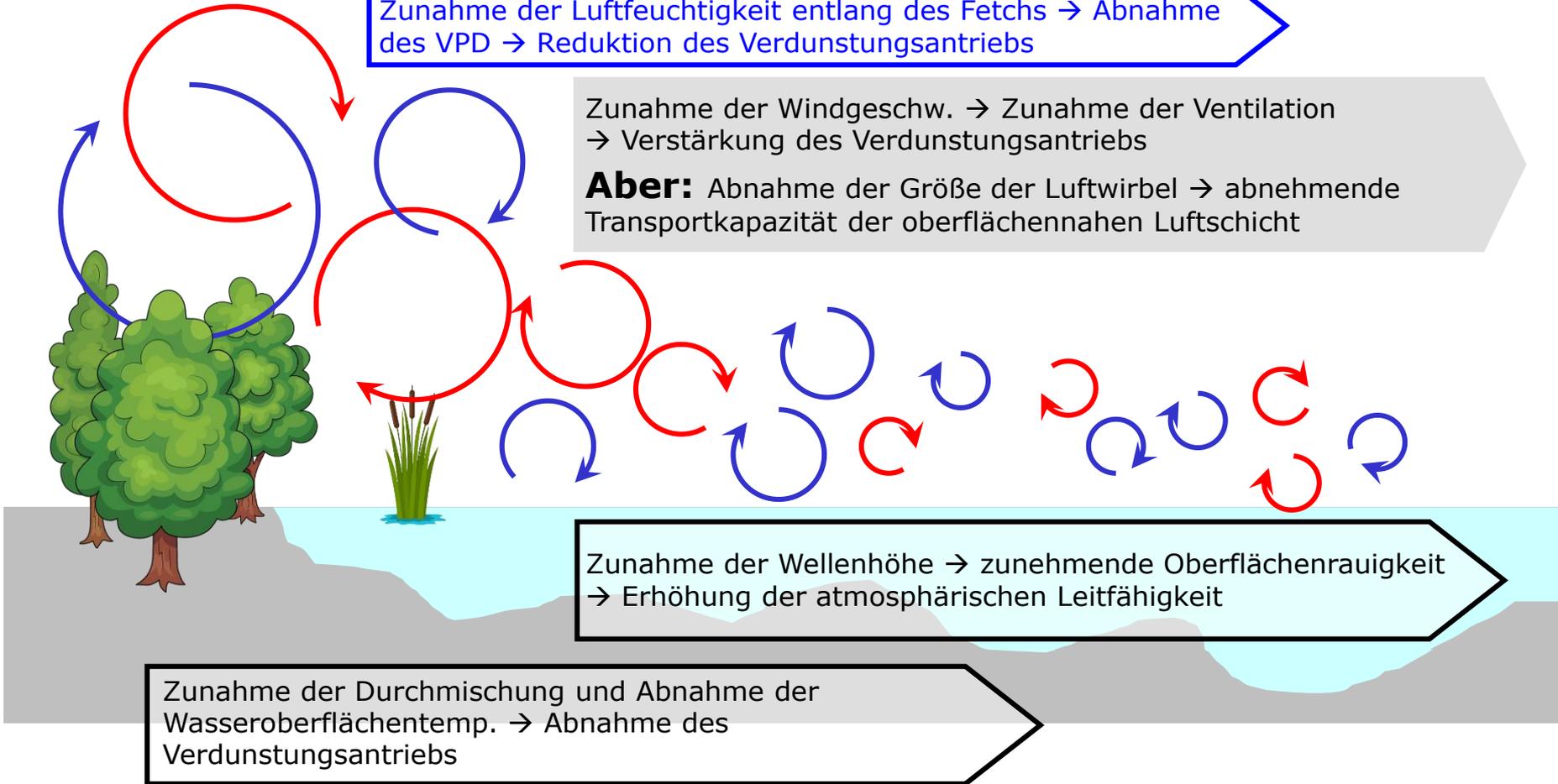
## Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu einer Oase

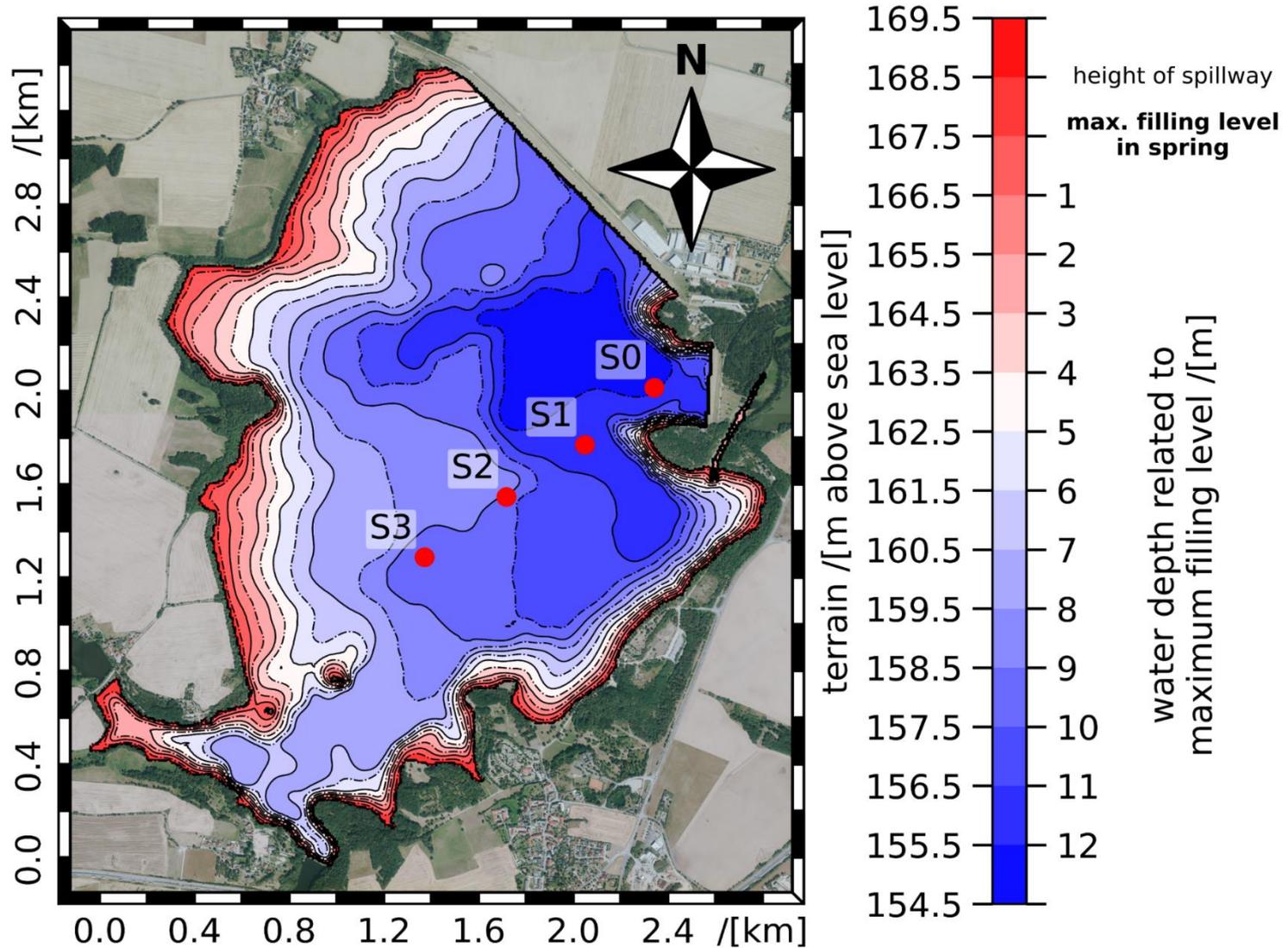
Advektion von Wärme und trockener Luft von umgebenden Landflächen

Zunahme der Luftfeuchtigkeit entlang des Fetchs → Abnahme des VPD → Reduktion des Verdunstungsantriebs

Zunahme der Windgeschw. → Zunahme der Ventilation → Verstärkung des Verdunstungsantriebs

**Aber:** Abnahme der Größe der Luftwirbel → abnehmende Transportkapazität der oberflächennahen Luftschicht

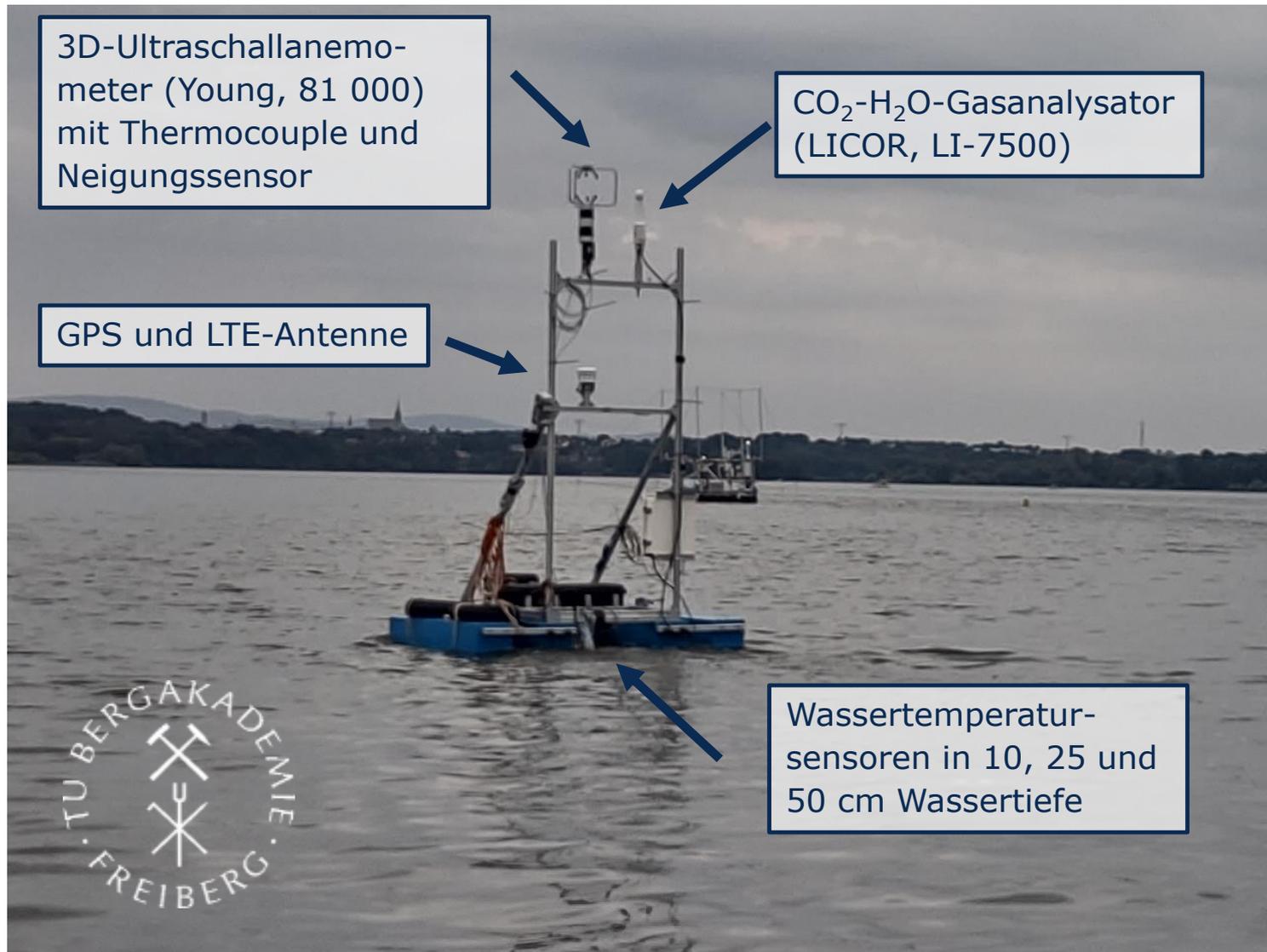




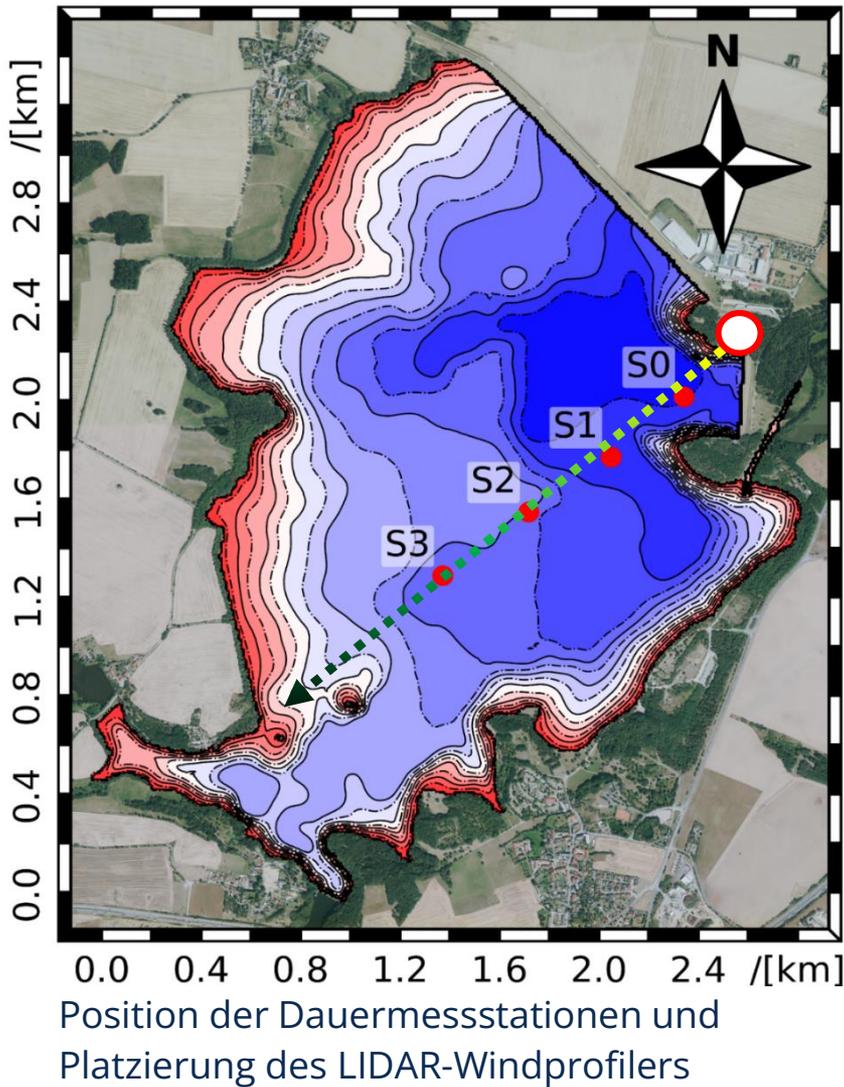
Installation von 4 Messstationen entlang der Hauptwindrichtung zur messtechnischen Erfassung der räumlichen Variabilität maßgebender meteorologischer und limnologischer Treibervariablen



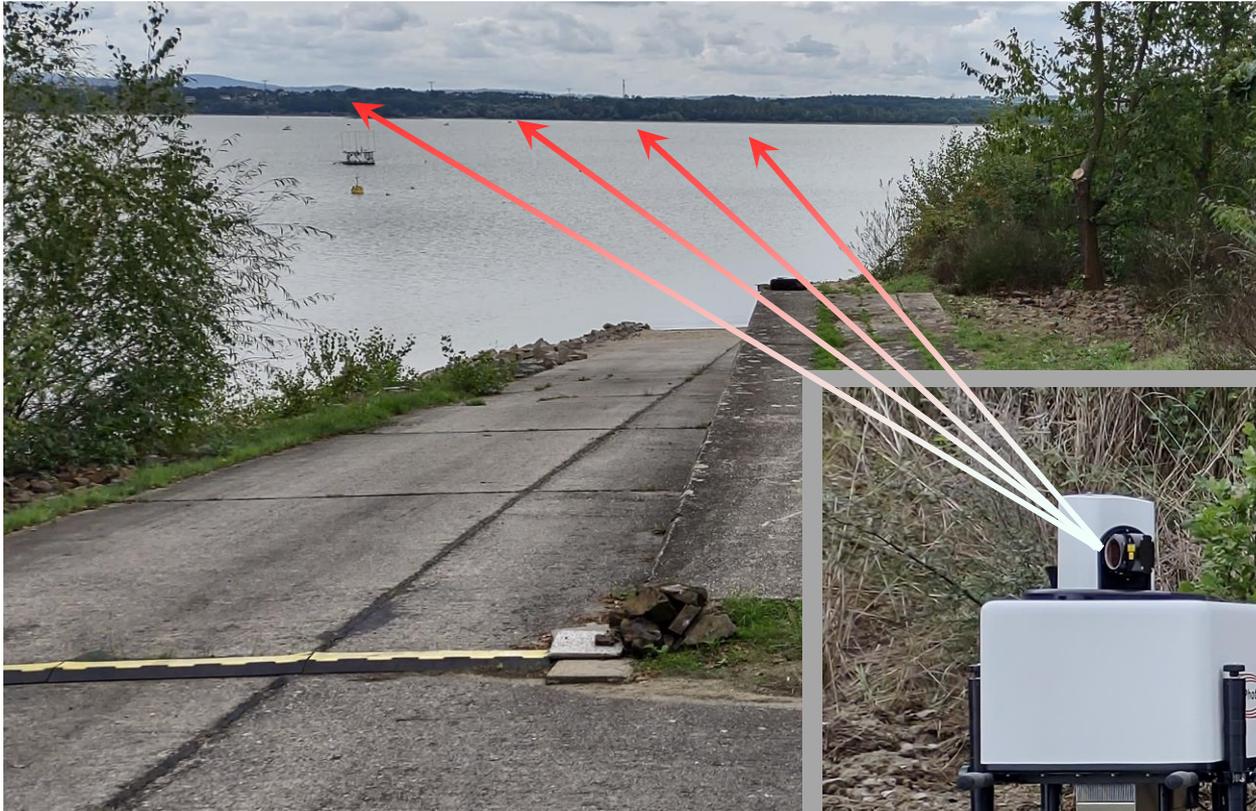
Satellitenplattform mit einem vereinfachten EC-Messsystem zur Beobachtung der räumlichen Variabilität meteorologischer und limnologischer Umweltgrößen



Autonom operierendes Roboterboot der TU Bergakademie Freiberg mit mobilen EC-Messsystem



Halo Photonics Stream Line<sup>XR</sup> Scanning Doppler LIDAR beim Einsatz an der Talsperre Bautzen (September 2022)



Sicht- und Scanfeld des Sensors



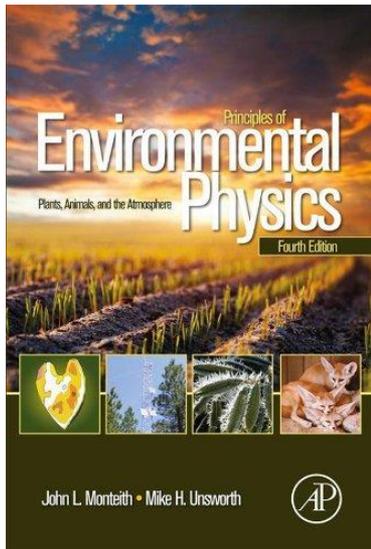
Halo Photonics Stream Line<sup>XR</sup> Scanning Doppler LIDAR



Windvektorkomponente entlang des Sensorstrahls (08. Sep. 2022)

- extreme räumliche und zeitliche Variabilität von Windgeschwindigkeit und Windrichtung → derzeit unzureichend in Modellen berücksichtigt

- Spank, U., Bernhofer, C., Mauder, M., Keller, P.S., Koschorreck, K. (2023): Contrasting temporal dynamics of methane and carbon dioxide emissions from a eutrophic reservoir detected by eddy covariance measurements , Meteor. Z. in press
- Guseva, S., Armani, F., Desai, A. R., Dias, N. L., Friberg, T., Iwata, H., Jansen, J., Lükő, G., Mammarella, I., Repina, I., Rutgersson, A., Sachs, T., Scholz, K., Spank, U., Stepanenko, V., Torma, P., Vesala, T., Lorke, A. (2022): Bulk Transfer Coefficients Estimated from Eddy-Covariance Measurements over Lakes and Reservoirs, Earth and Space Science Open Archive, <https://doi.org/10.1002/essoar.10511514.1>.
- Guseva, S., Casper, P., Sachs, T., Spank, U., Lorke, A. (2021): Energy Flux Paths in Lakes and Reservoirs, Water 13(22), 3270
- Moderow, U., Grünwald, T. Queck, R., Spank, U., Bernhofer, C. (2021): Energy balance closure and advective fluxes at ADVEX sites, Theor. Appl. Climatol., 143, 761–779
- Spank, U., Hehn, M., Keller, P. S., Koschorreck, M., Bernhofer, C. (2020): A Season of Eddy Covariance Flux Data from Germany’s Largest Drinking Water Reservoir Based on a Floating Observation Platform, Bound. Lay. Meteorol., 174, 433–464
- Spank, U., Köstner, B., Moderow, U., Grünwald, T., Bernhofer, C. (2016): Surface Conductance of Five Different Crops Based on 10 Years of Eddy-Covariance Measurements. Meteor. Z., 25(3), 251-266
- Spank, U., Schwärzel, K., Renner, M., Bernhofer, C. (2013): Effects of Measurement Uncertainties of Meteorological Data on Estimates of Site Water Balance Components. J. Hydrol., 492, 176-189



- Monteith, J.L., Unsworth, M.H. (2013):. Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere. 4th ed., Elsevier/Academic Press, Freier Download via: <https://denning.atmos.colostate.edu/readings/Monteith.and.Unsworth.4thEd.pdf>
- „Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Agrar- und Forstmeteorologie“. Promet Band 38 (2012/14), Heft 1/2, Freier Download via: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/pfb\\_verlag\\_promet/l\\_promethefte/38p12.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/pfb_verlag_promet/l_promethefte/38p12.html)
- Baufachinformation, Merkblatt DWA-M 504-1 (2018): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen - Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung der Landverdunstung, Gewässerverdunstung, Kostenpflichtiger Download: <https://www.baufachinformation.de/merkblatt-dwa-m-504-1-juli-2018/mb/249825>
- Vietinghoff, H. (2000): Die Verdunstung freier Wasserflächen: Grundlagen, Einflußfaktoren und Methoden der Ermittlung. 1. Aufl. UFO Naturwissenschaft 201. Allensbach: UFO, Atelier für Gestaltung & Verl, Freier Download via: <http://www.gewaesserschutz-vietinghoff.de/medien/verd1.pdf>

**Danke für Ihre  
Aufmerksamkeit**

