

# Verwendung eines akustischen Verfahrens zur Messung der Verdunstung freier Wasserflächen

A. Raabe<sup>1</sup>, P. Holstein<sup>2</sup>, J.C. de Araujo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut für Meteorologie, Univ. Leipzig, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig E-Mail: raabe@uni-leipzig.de

<sup>2</sup>Steinbeis Transferzentrum "TAAN", Margarethenweg 9a, 04425 Taucha E-Mail: peter.holstein@stw.de

<sup>3</sup>Universidade Federal do Ceara, Fortaleza Brasilien E-Mail: jcaraujo@ufc.br

## Einleitung

Besonders in Gegenden, wo es zu bestimmten Jahreszeiten so gut wie überhaupt nicht regnet, ist für das Management der Wasserversorgung eine möglichst genaue Kenntnis von Wasserverlusten, die auch aufgrund von Verdunstung entstehen, von Interesse. Beispielsweise wird die Wasserversorgung im Bundesstaat Ceara (Brasilien) außerhalb der Regenzeit (Februar-Mai) faktisch zu 100% über künstlich angelegte Wasserrückhaltebecken gewährleistet. Von diesen Wasserflächen verdunsten bis zu 2600 mm  $\pm$  2600 l/m<sup>2</sup> Wasser über das Jahr hinweg. Ein Ziel des Wassermanagements ist nun eine Optimierung der Verdunstungsverluste durch geeignete Maßnahmen. Voraussetzung ist eine genaue Bestimmung des Verdunstungsanteils.

Im Folgenden wird eine Messmethode und deren technische Umsetzung vorgestellt, die für das Bestimmen der Verdunstung von Ausschnitten von Wasserflächen geeignet ist. Die Einrichtung und der Betrieb dieser Messstationen soll sich für Monitoring eignen um Daten für verschiedenste Wasserflächen möglichst parallel erfassen zu können.

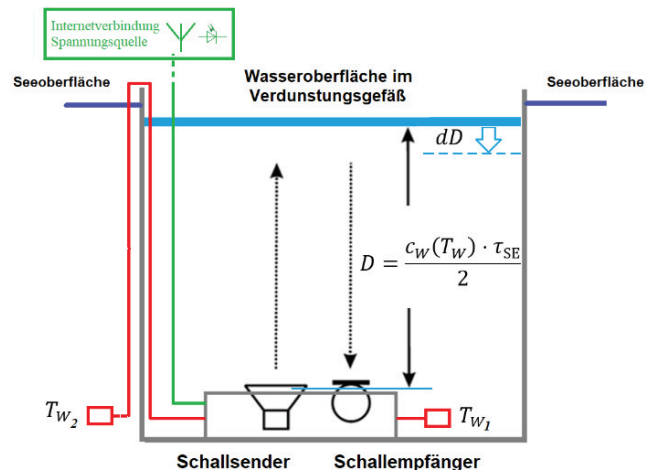
Eine direkte Messung der Verdunstung von einer Seeoberfläche wurde in der Vergangenheit u.a. mit Verdunstungsbehältern durchgeführt, die auf Flößen installiert waren. Für die Anordnung einer solchen Messung auf einem Floß gibt es eine Empfehlung von der WMO [1] bzw. durch die DVWK [2].

Die Bestimmung der Verdunstungsmengen erfolgte dabei früher durch Beobachter per Hand u.a. unter Verwendung von mechanischen Mikrometer-Messgeräten [3]. Ziel dabei die Ermittlung der Verdunstung pro Tag. Derzeit dienen z.B. hochempfindliche Differenzdrucksensoren dazu, um die Messungen kontinuierlich und automatisch durchführen zu können, so dass auch Aussagen über tageszeitrelevante Verdunstungsanteile erfasst werden können [4].

Das hier verwendete Messverfahren stammt aus der akustischen Laufzeit- und Füllstandüberwachung und funktioniert nach dem Echolotprinzip. Die Empfindlichkeit der Messanordnung reicht für den Nachweis von Verdunstungshöhen von 0,1mm aus, was empfindlich genug ist, um den Tagesgang der Verdunstung direkt für eine Wasserfläche zu bestimmen. Der Sensor basiert auf einem Modul zur hochgenauen Bestimmung von Laufzeiten akustischer Signale, das durch die SONOTEC GmbH [5] vertrieben wird und hier auf die Belange der akustischen Verdunstungsmessung angepasst wurde. Die Datenübertragung verwendet eine Lösung zur Internetanbindung und Cloudspeicherung der Fa. ESYS [6].

## Die Messmethode

Das Messsystem besteht aus einem akustischen Sensor, der auf dem Boden eines im Freiwasser schwimmenden Verdunstungsbehälters befestigt ist. Mit dem Sensor wird die Laufzeit akustischer Signale zwischen deren Position im Verdunstungsgefäß und der Wasseroberfläche bestimmt (Abb. 1). Es werden 2 MHz Schallsignale genutzt. Das Verfahren ist theoretisch in der Lage Laufzeiten auf 2 ps genau zu messen. Ausgewiesen werden für die einzelnen Laufzeitmessungen bei unveränderlichen Umgebungsbedingungen Unsicherheiten von 0,003  $\mu$ s. Im Experiment infolge von Bewegungen im Wasser und der Wasseroberfläche sowie thermischer Unterschiede im Wasser werden Genauigkeiten von 0,1  $\mu$ s erreicht, was auf eine Unsicherheit in der Entfernungsmessung von 0,1 mm führt. Zur Berechnung der Entfernung zwischen Sensorposition und Wasseroberfläche wird die aktuelle Wassertemperatur benötigt. Der Sensor misst dabei die Wassertemperatur im  $T_{w1}$  und außerhalb  $T_{w2}$  des Verdunstungsgefäßes was der Kontrolle eines eventuellen Temperaturunterschiedes zwischen dem Wasser im Gefäß und im Freiwasser dient.



**Abbildung 1:** Das Messprinzip entspricht dem Echolotverfahren, nur dass die Sender-/Empfängerkombination am Boden des Verdunstungsgefäßes positioniert ist und von da aus die Entfernung zur Oberfläche misst. Zwei Temperatursensoren kontrollieren die Wassertemperatur in und außerhalb des Verdunstungsgefäßes. Der Sensor steht in Verbindung mit einem Modul, das die Spannungsversorgung und die Verbindung zum Internet sichert.

Aus der Temperaturmessung  $T_{w1}$  [°C] wird die Schallgeschwindigkeit für das Wasser im Verdunstungsgefäß bestimmt:

$$c_w = 1402,95 + 5,044 \cdot T_{w1} - 0,056 \cdot T_{w1}^2 \quad \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (1)$$

Die Entfernung zur Wasseroberfläche ermittelt sich dann aus der gemessenen Laufzeit der Schallsignale  $\tau_{SE}$  und der Schallgeschwindigkeit:

$$D = \frac{c_w(T_{w1}) \cdot \tau_{SE}}{2} \quad (2)$$

Die verdunstete Wassersäule  $V$  (Verdunstungshöhe) wird dann aus der sich ändernden Wasserstandshöhe  $dD$  über eine bestimmte Zeit  $dt$  hinweg bestimmt:

$$V = \frac{dD}{dt} \quad \left[ \frac{mm}{h} \right] \quad (3)$$

Diese Messmethode benötigt keine weiteren meteorologischen Größen und kommt so einer auf SI-Einheiten zurückgeführten kalibrierten direkten Messung der Verdunstung nahe.

### Eine Berechnungsmethode

Die Verdunstung einer Freiwasserfläche kann z.B. nach dem DALTON-Verfahren [7] berechnet werden. Dazu wird die Wassertemperatur im Freiwasser  $T_{w2}$ , die Lufttemperatur  $T_L$ , die relative Luftfeuchtigkeit  $U$  und die Windgeschwindigkeit  $u$  über der Wasserfläche benötigt (s. Tab. 1).

Aus dem Feuchtigkeitssättigungsdefizit  $\Delta E$  [hPa] zwischen der Luftfeuchte an der Wasseroberfläche und in der Luft in Verbindung mit einer von der Windgeschwindigkeit abhängigen Verdunstungsrate berechnet sich die Verdunstung  $V$   $\left[ \frac{mm}{h} \right]$ :

$$V_{DALTON} = f(u) \cdot \Delta E = f(u) \cdot (E(T_{w2}) - e(T_L)) \quad (4)$$

$$f(u) = a + b \cdot u \quad \left[ \frac{mm}{h \cdot hPa} \right] \quad (5)$$

Wobei  $E(T_{w2}) = 6,107 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_{w2}}{238 + T_{w2}}} \quad [hPa] \quad (6)$

der Wasserdampfpartialdruck an der Wasseroberfläche bei der Wassertemperatur  $T_{w2}$  ist und

$$e(T_L) = \left( \frac{U}{100} \right) \cdot 6,107 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_L}{238 + T_L}} \quad [hPa] \quad (7)$$

der Wasserdampfpartialdruck in Luft.

Die Parameter a und b sind an das jeweilige Messgebiet anzupassen. Die WMO empfiehlt die Verdunstung mit dieser Methode für Tageswerte zu ermitteln. Die dafür vorgeschlagenen Werte sind hier für die Verdunstungsabschätzung über einem Zeitraum von einer Stunde (1h) angegeben [2]:

$$a_{WMO} = 0,00542; \quad b_{WMO} = 0,00392$$

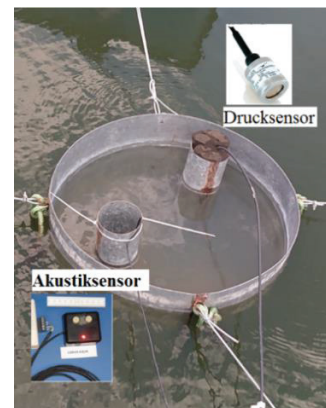
Die dann an das jeweilige Messgebiet angepassten Berechnungsformeln sind parametrisierte Beziehungen und somit eine Form der indirekten Verdunstungsermittlung.

### Ein Sensorvergleich

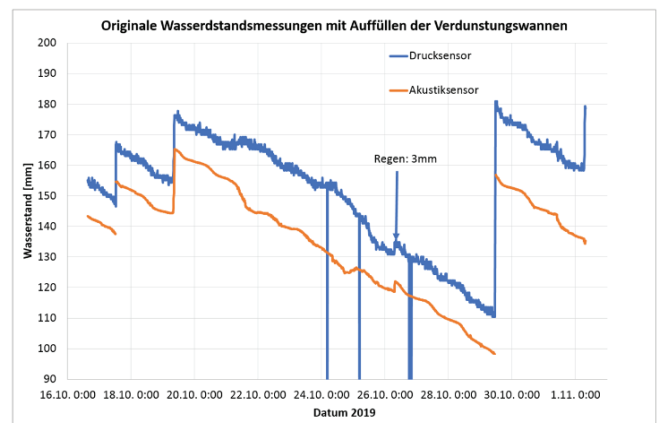
Der Akustik-Sensor wurde mit einem Verfahren zur Verdunstungsmessung verglichen, das einen Differenzdrucksensor verwendet (Fa. UTK – EcoSens GmbH [4]: Sensor Typ Keller 46X).

Dafür wurden beide Sensoren in einem Verdunstungsbehälter installiert. Zum Ausgleich der windinduzierten Wasseroberflächenbewegung befinden sich die Sensoren in einem Schutzrohr (Abb. 2).

Der abnehmende Wasserstand wird als Verdunstung interpretiert. Wird der Wasserstand im Gefäß zu niedrig ist ein Auffüllen nötig (erkennbar an den Stufen in der Registrierung, Abb. 3). Ähnliche Auswirkungen (Zunahme des Wasserstandes) haben Niederschlagsereignisse. Auffüllen und Niederschlag müssen für die Ermittlung der Verdunstung herausgefiltert werden.



**Abbildung 2:** Das Verdunstungsgefäß schwimmt befestigt an Pontons im Freiwasser. Die Sensoren befinden sich in eine Schutzrohr innerhalb des Verdunstungsgefäßes. Hier sind im Gefäß zwei Sensoren verbaut: ein akustischer Sensor und ein Differenzdrucksensor.



**Abbildung 3:** Die Darstellung der Wasserstandsregistrierung mit dem Drucksensoren und dem Akustiksensoren. Die Stufen sind auf das Nachfüllen des Verdunstungsbehälters bzw. Niederschlagsereignisse zurückzuführen.

Beide Messverfahren (Drucksensoren und Akustiksensoren) zeigen unter Einsatzbedingungen vergleichbare Ergebnisse (Abb.4.) Das Signal-Rauschverhältnis gestattet es, für den Akustiksensoren Verdunstungsmengen pro 1h zu ermitteln, der Drucksensoren benötigt Mittelungszeiten von 3h.

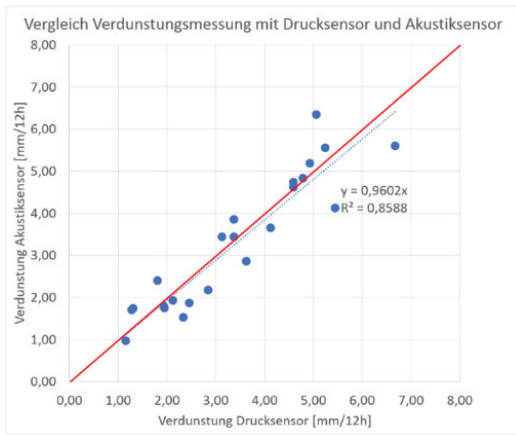


Abbildung 4: Die Korrelation der Messverfahren für Wasserstandsänderung über 12 h hinweg.

### Verdunstungsmessung - ein Beispiel

Der Akustiksensoren wurde für Verdunstungsmessungen über einem Wasserrückhaltebecken (Gaviao-See, Pacatuba, Ceara, Brasilien) eingesetzt. Während der Trockenzeit soll diese Art der direkten Verdunstungsmessung dazu dienen verbesserte Aussagen zur Wasserbilanz dieses in die Wasserversorgung einbezogenen Sees zu erhalten. Die Messungen können nun mit Modellen der Verdunstungsberechnung bzw. mit Berechnungsverfahren, wie dem DALTON-Verfahren verglichen werden.

In Abb. 5 ist die verdunstete Wassersäule über 2 Wochen hinweg gezeigt. Die Verdunstung zeigt einen Tagesgang. In der Nachthälfte (21-09) werden Verdunstungsmengen von etwa 2 mm/12h, am Tag (09-21) bis zu 6 mm/12h nachgewiesen (Abb. 6).

Die Verdunstung kann man mit dem DALTON-Verfahren berechnen, wenn die Parameter a und b angepasst werden.

GAVIAO:  $a_{GAVIAO} = 0,00542$ ;  $b_{GAVIAO} = 0,00500$

Verwendet man die von der WMO empfohlenen Parameter erhält man eine geringere Verdunstung (Abb. 5).

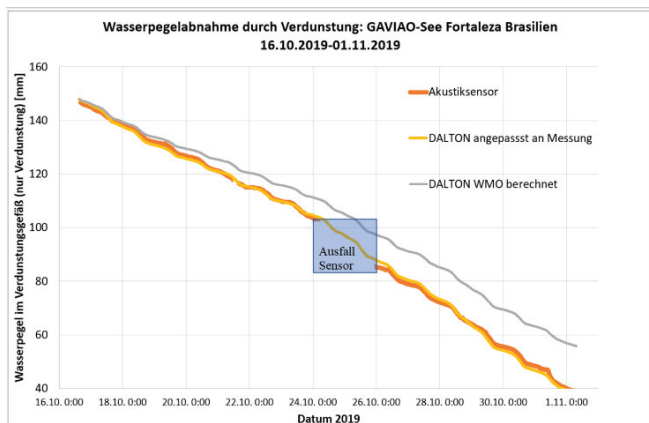


Abbildung 5: Die Beobachtung der Verdunstung über einem See (GAVIAO Pacatuba, Ceara, Brasilien) mit dem Akustik-Sensoren. Die Verdunstung zeigt sich als Wasserpegelabnahme und lässt sich auch mit einer angepassten DALTON-Gleichung berechnen (gelbe Linie,  $a_{GAVIAO}$ ,  $b_{GAVIAO}$ ). Verwendet man die von der WMO verschlagenen Parameter ( $a_{WMO}$ ,  $b_{WMO}$ ) berechnet sich eine geringere Wasserpegelabnahme (graue Linie).

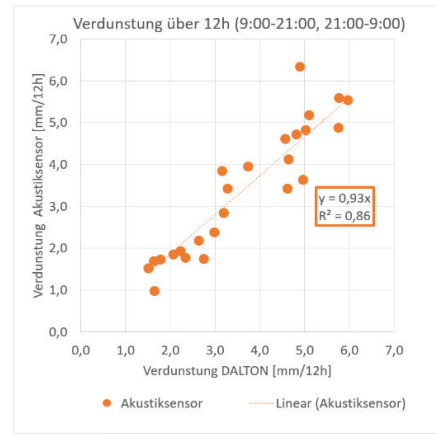


Abbildung 6: Vergleich zwischen Berechnung der Verdunstung (DALTON-Verfahren Gl. 4,5) und den mit dem Akustiksensoren direkt bestimmten Verdunstungsmengen bezogen auf einen Zeitraum von 12 h.

### Zusammenfassung

Das Beispiel der Verdunstungsmessung auf einem See in einem ariden Klima in Nordosten Brasiliens (Bundesstaat Ceara) bot die Möglichkeit Messung und Berechnungsverfahren zu vergleichen. Der Akustiksensoren erreicht dabei die notwendige Empfindlichkeit, um Aussagen über den Tagesgang der Verdunstung zu erhalten. Die Nachweisgrenze für die Verdunstungsmessung liegt dabei bei 0,1 mm. Das ist vor allem auf die Einsatzbedingungen zurückzuführen und resultiert unter anderem aus der durch den Wind bewegten Wasseroberfläche auch im Verdunstungsgefäß.

Damit steht ein akustischer Sensor zur Verfügung, mit dem die Verdunstung einer Freiwasserfläche direkt gemessen werden kann. Das ist eine Voraussetzung dafür, üblicherweise verwendete oder alternative Berechnungs- bzw. Beobachtungsmethoden für die Verdunstung zu prüfen und zu verifizieren. Die Empfindlichkeit des Messverfahrens reicht aus, um dieses auch in Gebieten einzusetzen in denen die Verdunstung nicht die hier im Beispiel gezeigten extremen Werte erreicht. So entstehen mit dem Auslaufen der Braunkohleförderung u.a. im Osten Deutschland zahlreiche Seen, die in eine entsprechende Wasserbewirtschaftung mit einbezogen werden müssen. Eine Komponente dabei ist die zuverlässige Bestimmung der Verdunstung auch unter sich ändernden klimatischen Verhältnissen.

Die Akustiksensoren (CORVO-aqua) sind in verschiedenen Ausführungsvarianten im Einsatz. Abb. 7 zeigt eine Variante, die über eine Schnittstelle mit einem PC verbunden werden kann. Der Sensor liefert automatisch alle 10 s eine Laufzeitmessung mit dazugehöriger Unsicherheit und zwei Wassertemperaturwerte. Für den Einsatz im Gelände steht eine Version zu Verfügung, die per Mobilfunk die Daten übertragen kann.



**Abbildung 7:** Eine Ausführungsvariante des Akustiksensors. Der Betrieb erfolgt dabei über eine RS 485/USB-Schnittstelle. Zwei Sensoren erfassen die Wassertemperatur in der Umgebung, was eine sichere Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im Wasser ermöglicht.

- [7] Dalton, J.: Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam of vapour from waters and other liquids in different temperatures, both in a torricellian vacuum and in air on evaporation and on the expansion of gases by heat. Mem. Manch. Lit. and Phil. Soc. 5: (1802) 535-602

**Tabelle 1:** Symbole und Maßeinheiten

Symbol	Bezeichnung	Maßeinheit
$D$	Entfernung zur Wasseroberfläche	mm
$\tau_{SE}$	Schallsignallaufzeit für eine Strecke $2 \cdot D$	s
$c_W$	Schallgeschwindigkeit im Wasser	$m \cdot s^{-1}$
$T_W$	Wassertemperatur	$^{\circ}C$
$T_L$	Lufttemperatur	$^{\circ}C$
$U$	Relative Luftfeuchtigkeit	%
$u$	Windgeschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
$E$	Wasserdampfpartialdruck an der Wasseroberfläche bei $T_W$	$hPa$
$e$	Wasserdampfpartialdruck in Luft	$hPa$
$a$	DALTON-Konstante bei Wind $u = 0 m \cdot s^{-1}$	$\frac{mm}{h \cdot hPa}$
$b$	DALTON-Konstante für Wind $u > 0 m \cdot s^{-1}$	$\frac{mm \cdot s}{h \cdot hPa \cdot m}$
$V$	Verdunstung	$mm \cdot h^{-1}$

## Literatur

- [1] Vietinghoff, H.: Die Verdunstung freier Wasserflächen – Grundlagen, Einflussfaktoren und Methoden der Ermittlung, Ufo Naturwissenschaft Band 201 (2002)
- [2] DVWK 1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK Merkblätter Nr. 238 (1996)
- [3] Richter, D.: Vergleichende Betrachtung verschiedener Methoden zur Bestimmung der Verdunstung von freien Wasserflächen, Zeitschr. F. Meteorol, Bd. 255:12 (1975) 117-121
- [4] UTK 2018: Verdunstungsmessung auf Talsperre Kelbra. <https://utk-ecosens.com/cms/2018/06/verdunstungsmessung-auf-talsperre-kelbra/p1090557/>
- [5] SONOTEC GmbH, Halle: <https://www.sonotec.de/produkte/nicht-invasive-fluessigkeitsueberwachung/> fuellstandsueberwachung/
- [6] ESYS GmbH Berlin: <https://www.esys.eu/start.html>