

Einleitung und Methoden

Im Rahmen des Masterpraktikums wurden für fünf Wochen im Mai / Juni 2017 am Horstmarer Landweg Daten zu Energie- und Stoffflüssen zwischen Bio- und Atmosphäre aufgenommen. Dazu wurden CO₂ und H₂O mittels Licor Li-7500 Open Path CO₂/H₂O-Analyzer, die drei Windkomponenten mittels Gill R3-50 Ultraschallanemometer und Trocken- sowie Feuchttemperaturen mittels zweier Frankenberger-Aspirationspsychrometer in zwei verschiedenen Höhen gemessen. Zur Erfassung der Energiebilanz wurden die Strahlung und der Bodenwärmestrom gemessen. Zur Berechnung der Flüsse wurde unter anderem die Software EddyPro verwendet und die Auswirkung verschiedener Korrekturverfahren analysiert. Außerdem wurden die Verfahren Eddy-Kovarianz (Abb. 1 A), Bowen-Ratio (Abb. 1 B) sowie Penman¹ angewendet. Die Standorteignung wurde anhand zweier unterschiedlicher Tage bewertet. Hierbei wurden die Energiebilanz, Energie- und Wasserdampf Flüsse, Footprints und Kospektren näher betrachtet.

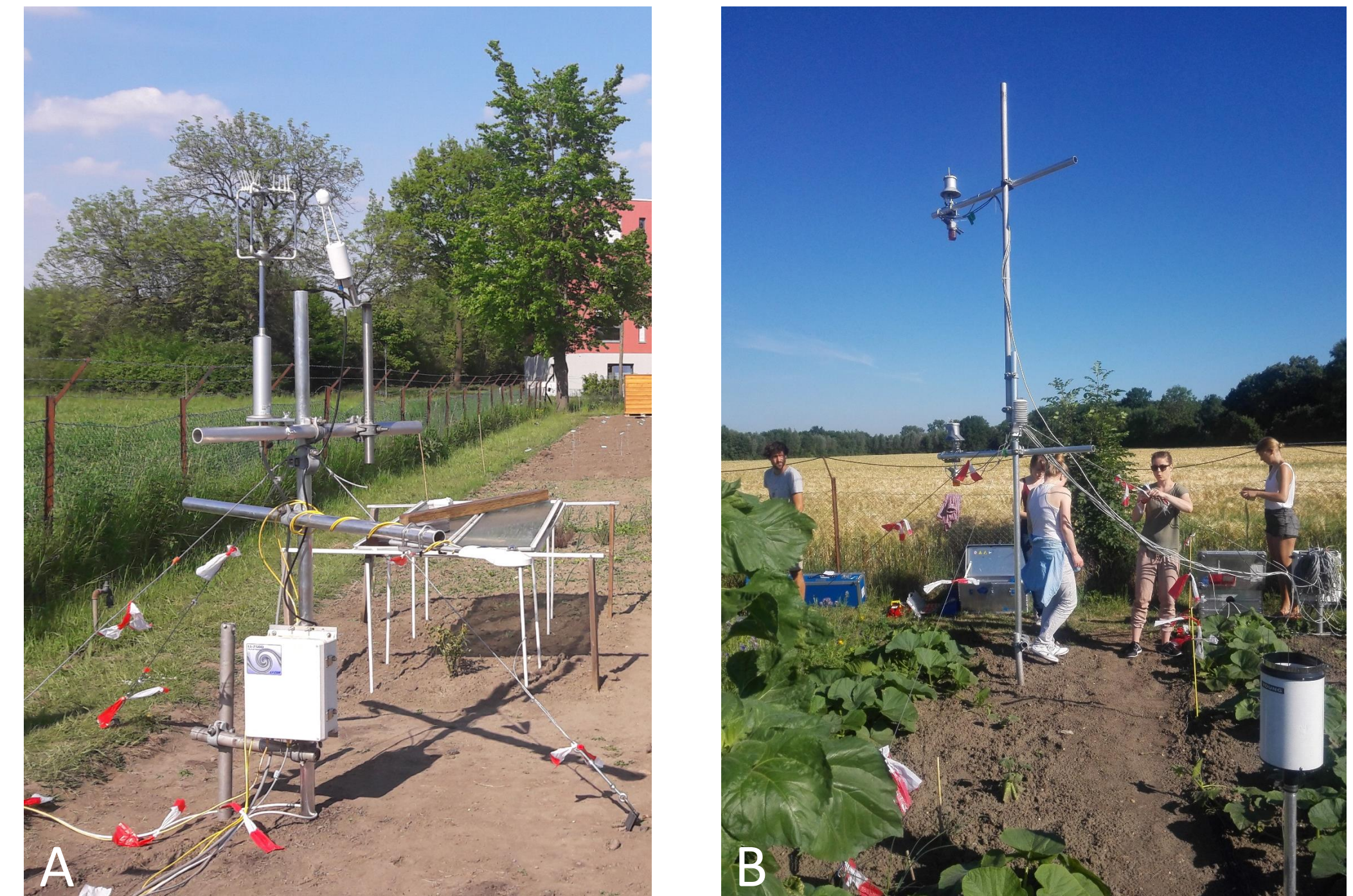


Abb. 1: Versuchsaufbau. Aus Südwest: Eddy-Kovarianz-Verfahren mit Wind-, CO₂-, H₂O-Messung sowie Strahlung (A) . Aus Südost: Bowen-Ratio-Verfahren mit zwei Aspirationspsychrometern und ein Temperatursensor sowie eine Niederschlagswaage im Vordergrund (B).

Footprintanalyse

Der Footprint stellt das Quellgebiet der gemessenen Turbulenzen dar und liegt auf der windzugewandten Seite des Messstandortes.² Die Lage des Footprints ist von verschiedenen Faktoren, wie der Windgeschwindigkeit



Abb. 2: Footprint für den 27.05. (A) und den 12.06. (B) für 40 %, 60 % und 80 % (von innen nach außen). Die rote Markierung zeigt den Messstandort.

und -richtung, der Stabilität der Atmosphäre sowie der Messhöhe, abhängig. Zur Berechnung des Footprints wurde das Modell von Kormann und Meixner verwendet, bei dem die meteorologischen Daten mit Daten der Umgebung des Messstandortes kombiniert werden.³ Daraus wird ein 2-dimensionaler Footprint berechnet. Für den 27.05. liegt der Footprint südöstlich vom Messstandort (Abb. 2 A). Der 80%-Footprint ist mehr als 50 m lang und liegt größtenteils innerhalb des Grünlandes. Durch den angrenzenden Zaun und Weg kann der Footprint durch Bildung einer internen Grenzschicht beeinflusst werden. Für den 12.06. (Abb. 2 B) befindet sich der Footprint westlich bis südwestlich des Messstandortes. Dabei werden hauptsächlich die Ackerfläche, aber auch Teile des Grünstreifens erfasst. Das Windfeld kann durch Zäune und Gehölzstrukturen beeinträchtigt werden.

Einfluss verschiedener Korrekturverfahren auf die gemessenen CO₂-Flüsse

Die Qualität der Messungen nach der Eddy-Kovarianz-Methode hängt weniger von der Gerätetechnik, als von den Einsatzbedingungen und der richtigen Durchführung von Korrekturen ab.² In Tabelle 1 sind die Effekte verschiedener Korrekturverfahren auf die Messwerte der beiden Vergleichstage aufgeführt. Bei der WPL-Korrektur handelt es sich um eine Dichtekorrektur nach Webb, Pearman und Leuning.⁴ Am 27.05. ist der nicht korrigierte CO₂-Fluss tagsüber negativ, der Effekt der WPL-Korrektur ist jedoch so groß (95 %), dass der Fluss danach um Null fluktuiert (Abb. 3 A). Am 12.06. wurde tagsüber ein negativer CO₂-Fluss erfasst, da die Photosynthese der Vegetation CO₂ verbraucht (Abb. 3 B). Durch die WPL-Korrektur wird eine Veränderung des Flusses um 30 % (Median) hervorgerufen. Der stärkere Effekt der Korrektur am 27.05. lässt sich auf

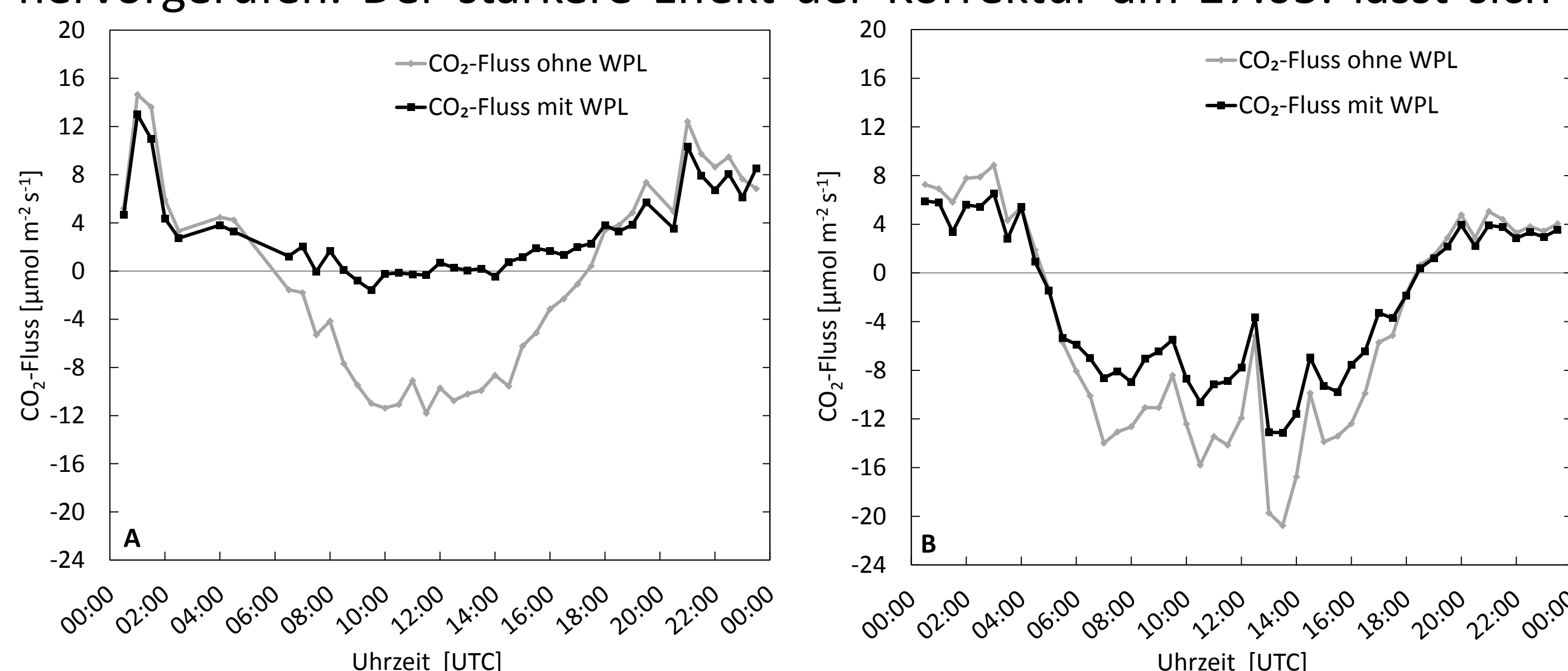


Abb. 3: CO₂-Fluss mit und ohne Anwendung der WPL-Korrektur am 27.05. (A) und am 12.06. (B).

den höheren sensiblen und latenten Wärmefluss an diesem Tag zurückführen, der zu erhöhter Dichtefluktuations führt. Die Korrektur der Tiefpassfiltereffekte hat ebenfalls eine große Auswirkung auf den CO₂-Fluss an beiden Tagen. Mit einem Median von 39 % ist der Effekt am 27.05. deutlich höher als am 12.06. (16 %). Die Entfernung von Spikes aus den Daten hat am 12.06. nur einen kleinen Einfluss auf den CO₂-Fluss (0,4 %). Am 12.06. liegt der Einfluss bei 8,4 % (Median). Für die Korrektur der Hochpassfiltereffekte liegt der Median am 27.05. bei 8,3 % und am 12.06. bei 7,3 %. Die Kompensation des Zeitversatzes zwischen den unterschiedlichen Messgeräten führt zu einem Effekt mit einem Median von 8,2 % am 27.05. und 6,4 % am 12.06.

Tabelle 1: Median des Einflusses verschiedener Korrekturverfahren auf den CO₂-Fluss am 27.05. und 12.06.

Verfahren	Effekt auf den Betrag des Flusses	27.05.	12.06.
WPL-Korrektur	negativ	95 %	30 %
Zeitversatz-Kompensation	positiv/negativ	8,2 %	6,4 %
Spike-Entfernung	positiv/negativ	8,4 %	0,4 %
Korrektur von Hochpassfiltereffekten	negativ	8,3 %	7,3 %
Korrektur von Tiefpassfiltereffekten	negativ	39 %	16 %

Energiebilanz

Die Energiebilanz zeigt einen Energiefluss von durchschnittlich 34 W m⁻² zur Erdoberfläche über den Messzeitraum vom 23.05.2017 bis 18.06.2017. Sie wird aus Strahlungsbilanz, Bodenwärmestrom, latentem und fühlbarem Wärmestrom berechnet. Die relative Energiebilanz liegt für den Messzeitraum bei 0,72. Sie berechnet sich aus der Summe des fühlbaren und latenten Wärmestroms dividiert durch die Differenz von Strahlungs-

bilanz und Bodenwärmestrom. Ein Verhältnis von 1 würde einen vollständigen Ausgleich aller Energieflüsse anzeigen. Das Verhältnis von 0,72 weist darauf hin, dass ein Großteil der positiven durch negative Energieflüsse ausgeglichen wurde. Für den Messzeitraum gibt es jedoch keinen vollständigen Ausgleich. Eine Annäherung an den Idealwert von 1 ist über den Verlauf eines oder mehrerer Jahre möglich.

¹ Penman, H.L. (1963): Vegetation and Hydrology. Technical Communicate 53. Commonwealth Bureau of Soils. Harpenden. 124

² Foken, T. (2016): Angewandte Meteorologie. Mikrometeorologische Methoden. 3. Aufl. Berlin Heidelberg

³ Neftel, A., Spirig, C., and Ammann, C. (2008): Application and test of a simple tool for operational footprint evaluations. Environmental Pollution. 152 (3) 644-652

⁴ Webb, E.K., Pearman, G.I., Leuning, R. (1980): Correction of the flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society. 106, 85–100

Fazit

Die Frage nach der Standorteignung für Flussmessungen kann nicht abschließend beantwortet werden. Es zeichnen sich bezüglich des sensiblen Bowen-Ratio-Verfahrens gute (Beispiel 12.06.) und schlechte (Beispiel 27.05.) Tage ab. Insgesamt sind die Windrichtungen Südwest bis Nordwest günstig. Die Windrichtung Ost ist für das Verfahren ungünstig. Mittels der Kospektren wird für den 27.05. ein gestörtes Windfeld festgestellt. Diese

Störung könnte durch eine Änderung des Untergrundes (Weg, Grünland) induziert sein. Die Footprintanalyse zeigt, dass weitere Störelemente im Quellgebiet liegen. Die Methoden nach Penman¹ und Eddy-Kovarianz können insgesamt erfolgreich angewendet werden. Auch für die Erstellung einer Energiebilanz ist der Standort geeignet. Der ermittelte Wert ist der Jahreszeit und den Wetterbedingungen entsprechend plausibel.

27.05.2017

Methodenvergleich Wasserdampffluss und fühlbarer Wärmefluss

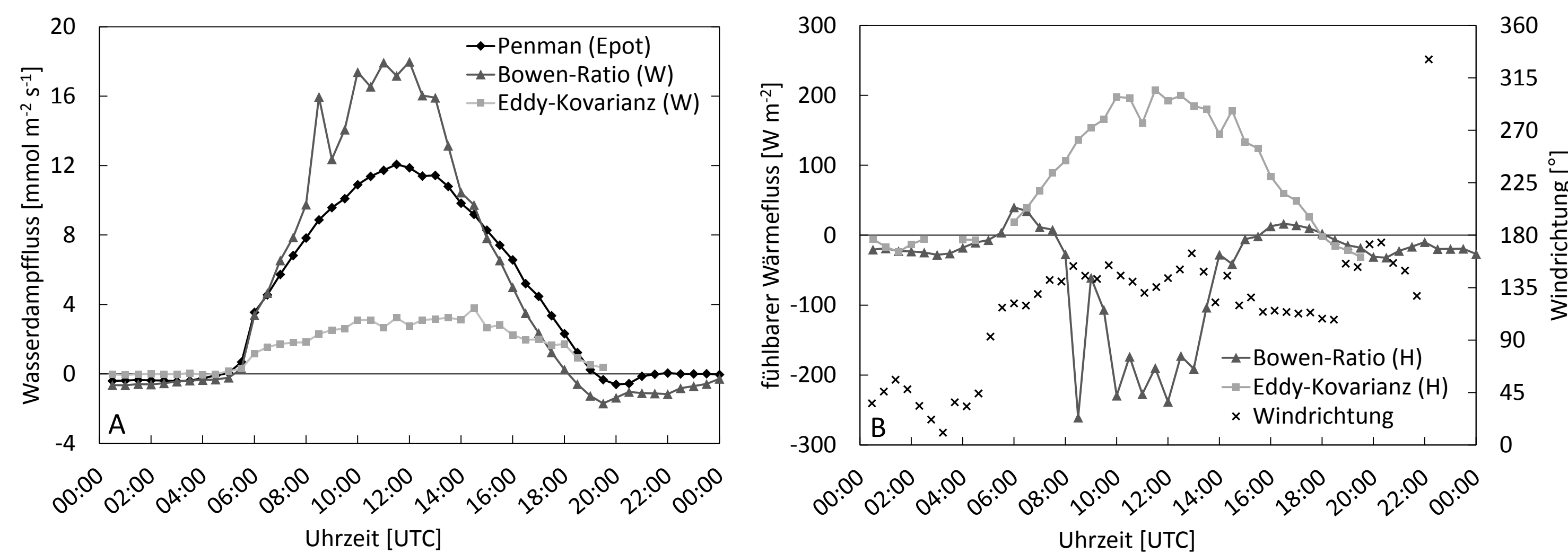


Abb. 4: Methodenvergleich zwischen Penman-Verfahren, Bowen-Ratio und Eddy-Kovarianz für den Wasserdampffluss (A) und den fühlbaren Wärmefluss (B) mit Windrichtungsmessung am 27.05.

Am 27.05. gibt das Bowen-Ratio-Verfahren falsche Flüsse aus. Der Wasserdampffluss (W) ist größer, als er nach Penman maximal möglich wäre (E_{pot}) und zeigt keine Übereinstimmung mit jenem aus dem Eddy-Kovarianz-Verfahren (Abb. 4 A). Auch der negative fühlbare Wärmefluss (H) verweist auf große Probleme bei der Anwendung des Verfahrens. Der Wind kam am 27.05. tagsüber aus Südost (Abb. 4 B). In dieser Richtung befinden sich unweit der Messstation ein asphaltierter Weg und eine Grünfläche. Diese Inhomogenität dürfte das Windfeld und damit die Temperaturschichtung maßgeblich beeinflussen. Der potentielle Fluss nach Penman (E_{pot}) ist höher als der mittels Eddy-Kovarianz gemessene Fluss (W). Die Graphen beider Methoden zeigen einen plausiblen Verlauf.

Energiebilanz

Die Strahlungsbilanz (Q_s) mit ihrem symmetrischen Verlauf indiziert einen wolkenlosen Himmel mit permanenter Sonneneinstrahlung. Ein Maximum der Energiebilanz ist um ca. 11 Uhr ersichtlich, da zu dieser Zeit die kurzwellige Einstrahlung besonders hoch ist. Am 27.05. wurden durchschnittlich 57 W m^{-2} von der Erdoberfläche aufgenommen. Dieser Wert ist höher als der durchschnittliche Energiefluss von 34 W m^{-2} , der für den gesamten Messzeitraum ermittelt wurde.

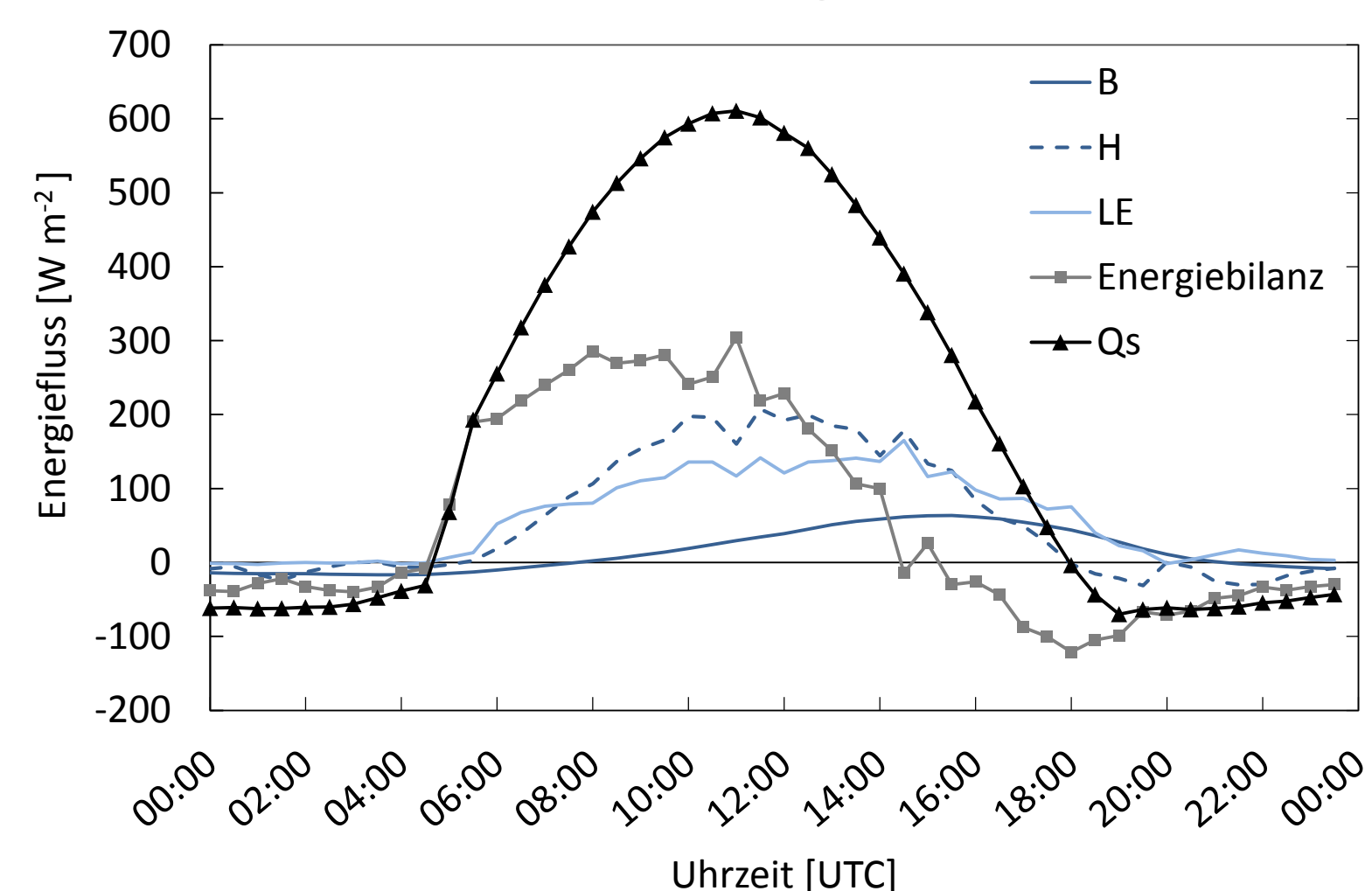


Abb. 6: Energiebilanz des 27.05. mit Strahlungsbilanz (Q_s), Bodenwärmestrom (B), fühlbarem Wärmestrom (H) und latentem Wärmestrom (LE).

Kospektren des CO_2 -Flusses

Kospektren können zum einen über die Qualität einer Messung Aufschluss geben und zum anderen darüber, welcher Teil der Frequenzen (Größe der Turbulenzelemente) zum Gesamtfluss beiträgt. An den zwei Tagen zeigen sich Unterschiede in den Kospektren für den CO_2 -Fluss. Am 27.05. in der Zeit von 12:00 Uhr bis 12:30 Uhr zeigt sich ein gestörtes Windfeld (Abb. 8). Im Bereich der *inertial subrange* fällt die Dichte der Frequenzen mit einer flacheren Steigung als $-4/3$. Zudem zeigt sich im markierten Bereich ein Anstieg der Frequenzdichte. Dies lässt auf den Eintrag von kleineren Turbulenzelementen durch ein Hindernis im Footprint schließen.

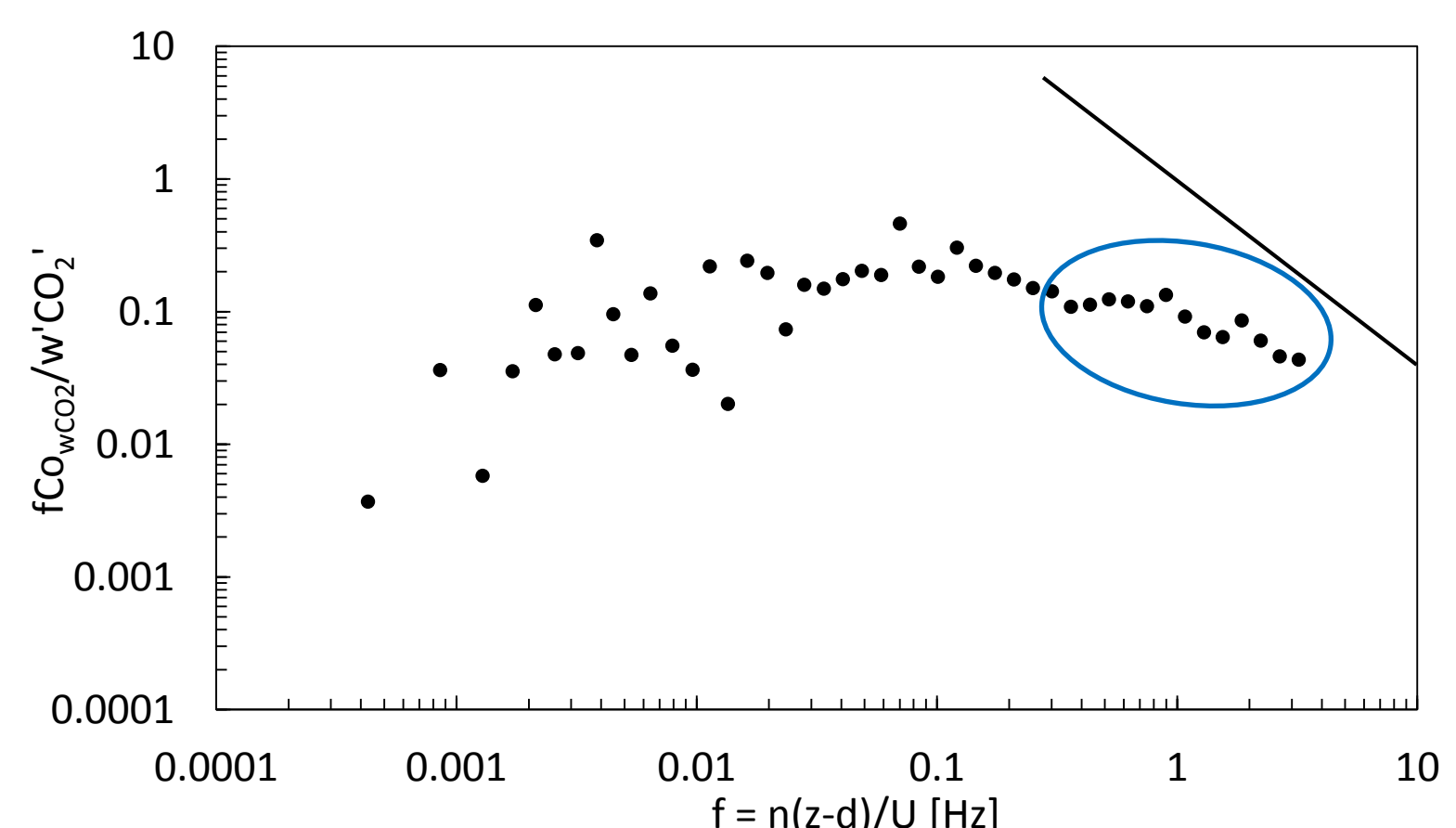


Abb. 8: Kospektrum des 27.05. 12:00 - 12:30 UTC. Die *inertial subrange* liegt im Bereich von 0,1 Hz bis 5 Hz. Die blaue Ellipse markiert einen gestörten Bereich.

12.06.2017

Methodenvergleich Wasserdampffluss und fühlbarer Wärmefluss

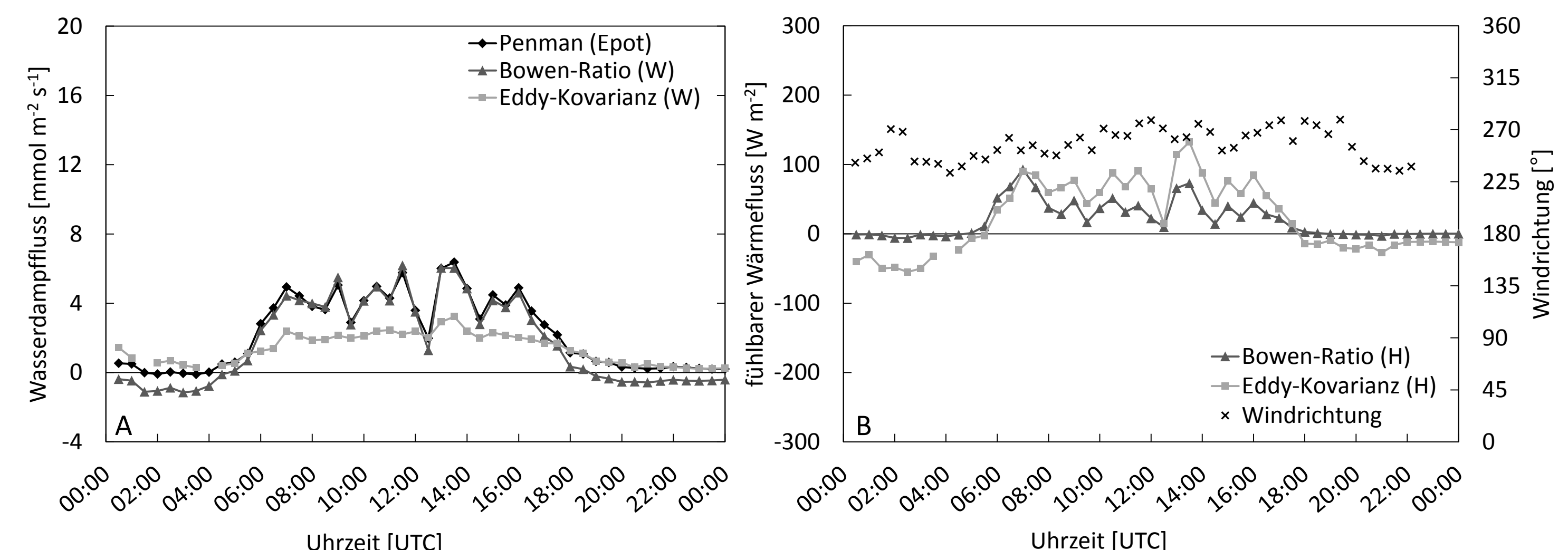


Abb. 5: Methodenvergleich zwischen Penman-Verfahren, Bowen-Ratio und Eddy-Kovarianz für den Wasserdampffluss (A) und den fühlbaren Wärmefluss (B) mit Windrichtungsmessung am 12.06.

Für den 12.06. ergeben sich sinnvolle Werte für das Bowen-Ratio-Verfahren. Die Flüsse der verschiedenen Methoden zeigen gute Übereinstimmung. Der ermittelte Wasserdampffluss (W) des Bowen-Ratio-Verfahrens gleicht dem potentiellen Fluss nach Penman (E_{pot}). Der Theorie nach sollte er jedoch dem geringeren Fluss des Eddy-Kovarianz-Verfahrens ähneln (Abb. 5 A). Der Vergleich der Wärmeflüsse (H) aus Bowen-Ratio und Eddy-Kovarianz funktioniert an diesem Tag mit Windrichtung West gut (Abb. 5 B). In dieser Richtung liegt eine Ackerfläche. Diese ermöglicht aufgrund der Größe des Footprints ein ungestörtes Windfeld.

Energiebilanz

Aus den Schwankungen der Strahlungsbilanz (Q_s) des 12.06. lässt sich folgern, dass die Erdoberfläche durch die Wolkenbedeckung von der einfallenden kurzwelligen solaren Strahlung abgeschirmt wird. Hierdurch zeigt die Energiebilanz tagsüber nur etwa halb so hohe Werte wie am wolkenfreien 27.05. Der Energiefluss zur Erdoberfläche ist deutlich geringer, sodass eine mittlere Energiezunahme von 18 W m^{-2} zu verzeichnen ist.

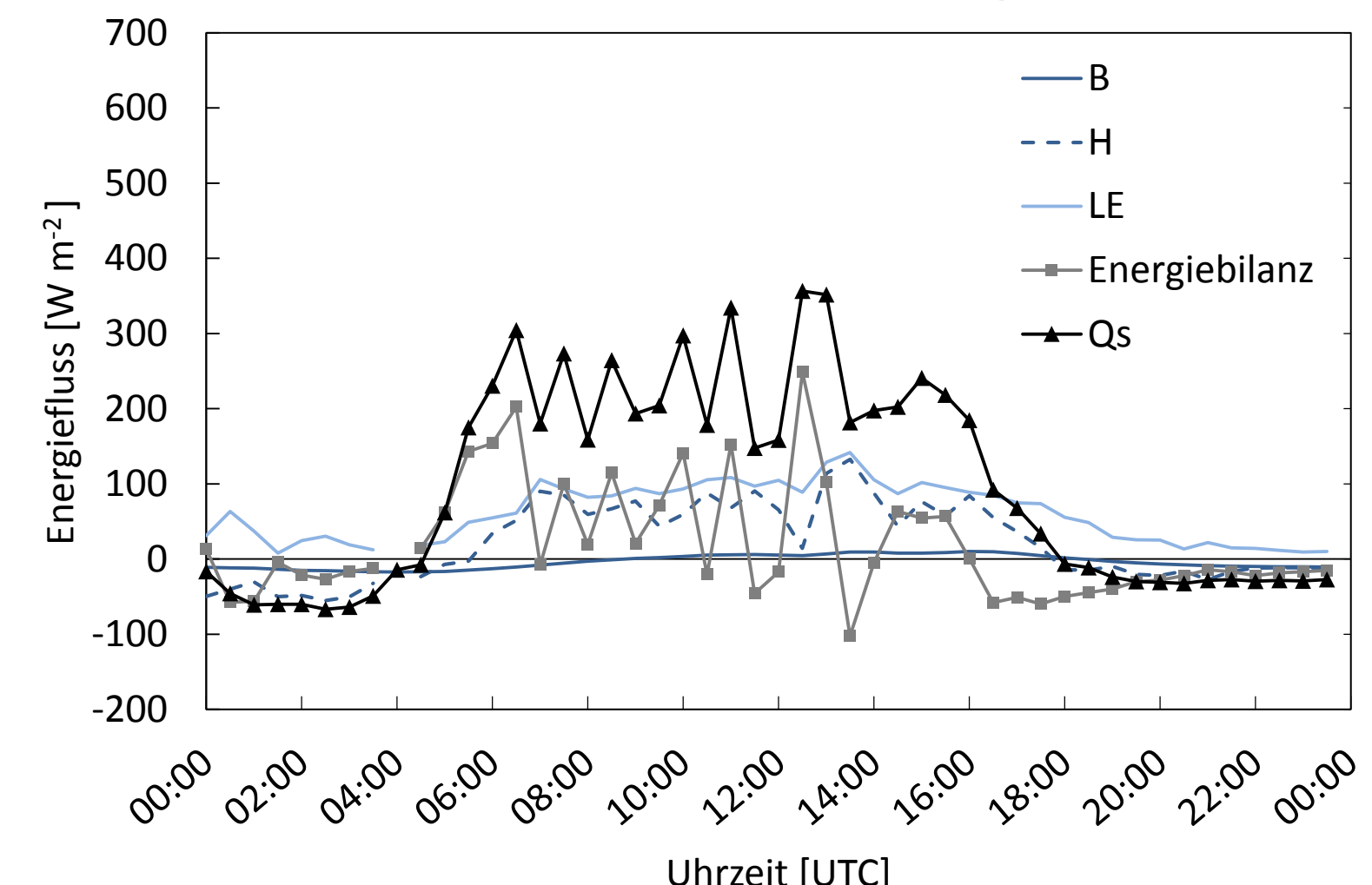


Abb. 7: Energiebilanz des 12.06. mit Strahlungsbilanz (Q_s), Bodenwärmestrom (B), fühlbarem Wärmestrom (H) und latentem Wärmestrom (LE).

Kospektren des CO_2 -Flusses

Am 12.06. in der Zeit von 12:00 Uhr bis 12:30 Uhr ist das Frequenzspektrum im Gegensatz zum 27.05. ungestört (Abb. 9). Die Frequenzdichte fällt mit einer Steigung von ca. $-4/3$. Maßgeblich für die Qualität des Kospektrums ist die Herkunft der Turbulenzelemente, also der Footprint. Dieser liegt am 27.05. südöstlich der Messstation und am 12.06. westlich der Messstation. Der in südöstlicher Richtung liegende Weg bewirkt eine Störung im Windfeld und könnte Ursache für die erhöhte Dichte an kleinen Frequenzen sein. Im Westen der Station befindet sich eine Ackerfläche. Über dieser entwickelt sich ein ungestörtes Windfeld.

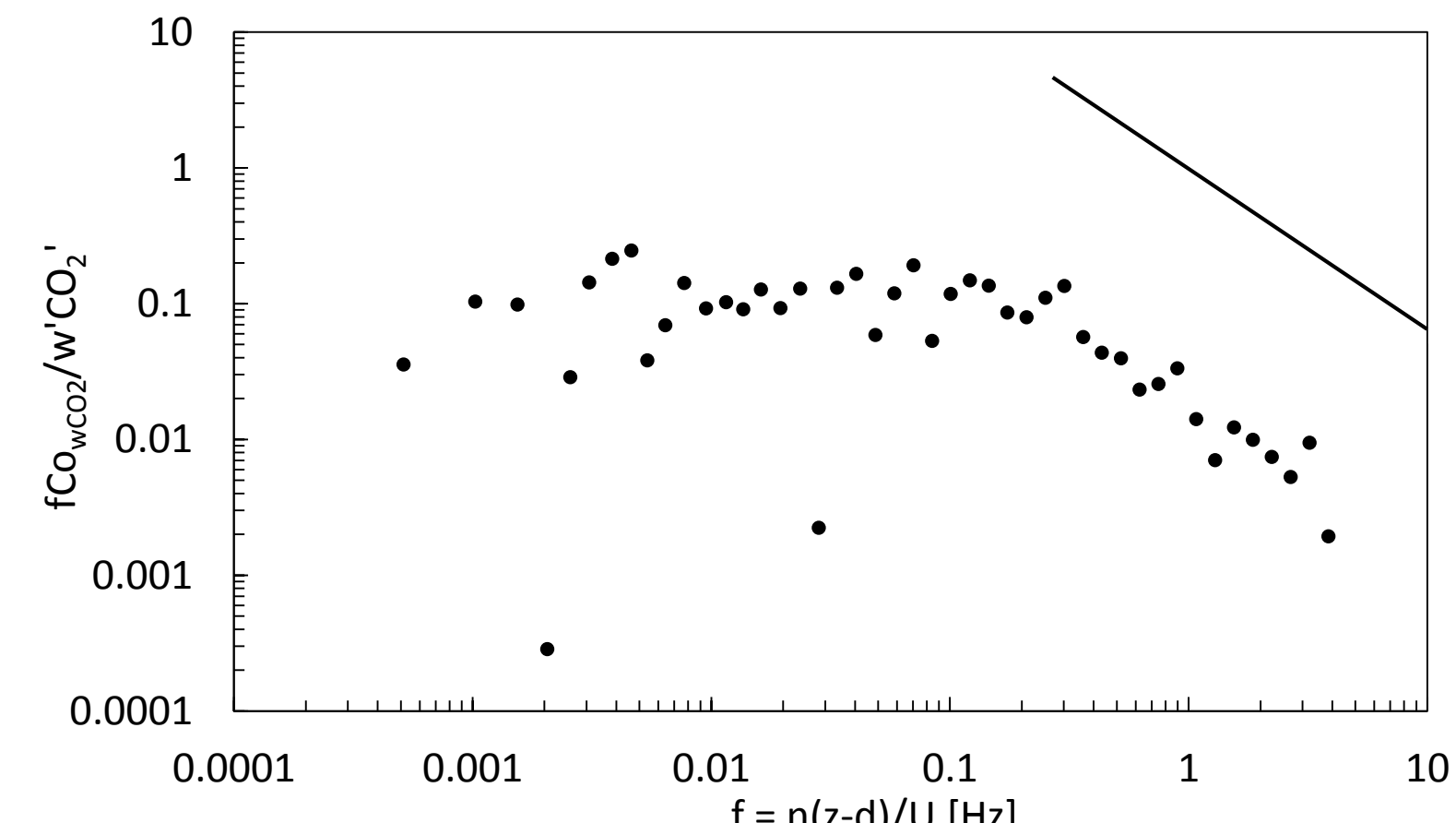


Abb. 9: Kospektrum des 12.06. 12:00 - 12:30 UTC. Die *inertial subrange* liegt im Bereich von 0,1 Hz bis 5 Hz.

¹ Penman, H.L. (1963): Vegetation and Hydrology. Technical Communicate 53. Commonwealth Bureau of Soils. Harpenden. 124