

**Fakultät für Physik und Astronomie  
der Ruprecht-Karls-Universität  
Heidelberg**

Bachelorarbeit im Studiengang Physik

vorgelegt von

**Lena Maria Patkai**

geboren in Speyer (Deutschland)

**2024**



# Untersuchung des Einflusses von Oberflächenfilmen auf den luftseitig kontrollierten Gasaustausch am Heidelberg Aeolotron

Diese Bachelorarbeit wurde ausgeführt von Lena Maria Patkai  
am Institut für Umwelphysik Heidelberg  
unter der Betreuung von  
Prof. Dr. Bernd Jähne

## **Zusammenfassung**

Der Einfluss der beiden unlöslichen monomolekularen Filme Hexadecanol und Olivenöl, sowie dem löslichen Tergitol 15-S-12 (5 ppm) auf den luftseitig kontrollierten Gasaustausch wurde untersucht. Alle drei Filme hemmten die Wellenbildung bei mittleren Windgeschwindigkeiten bis etwa 8 m/s. Invasionsexperimente mit den flüchtigen Stoffen Pyrazin und 2,5-Dimethylpyrazin, bei denen der wasserseitige Transferwiderstand vernachlässigbar ist, wurden durchgeführt. Zum Vergleich wurde gleichzeitig Anisol verwendet, dessen Transferwiderstand hauptsächlich im Wasser auftritt. Die Gaskonzentrationen wurden mithilfe von UV-Spektroskopie in einer Absorptionsstrecke von ca. 130 cm gemessen. Trotz der Unterdrückung der Wellenbildung reduzierte sich die luftseitige Transfargeschwindigkeit nur um etwa 20 % im Vergleich zur Windgeschwindigkeit, was als obere Schranke der Reduktion zu werten ist, da die Schubspannungsgeschwindigkeit ebenfalls reduziert sein könnte. Im Gegensatz dazu wurde die wasserseitige Transfargeschwindigkeit von Anisol mindestens um den Faktor zwei verringert. Dies deutet darauf hin, dass der Gasaustausch im Wasser nicht direkt durch den monomolekularen Film behindert wird, sondern durch die Reduktion der oberflächennahen Turbulenz. Zudem wurde der Einfluss von Eisschollen, simuliert durch schwimmende Moosgummiplatten, auf die Gasaustauschrates untersucht, wobei eine der Oberflächenbedeckung entsprechende Reduktion festgestellt wurde.

## **Abstract**

The influence of the insoluble monomolecular films -hexadecanol and olive oil, as well as the soluble Tergitol 15-S-12 (5 ppm), on air-side controlled gas exchange was investigated. All three films suppressed wave formation at average wind speeds of up to about 8 m/s. Invasion experiments were conducted with the volatile substances pyrazine and 2,5-dimethylpyrazine, for which the water-side transfer resistance is negligible. For comparison, anisol was simultaneously used, whose transfer resistance primarily occurs in water. The gas concentrations were measured using UV spectroscopy with an absorption path of approximately 130 cm. Despite the suppression of wave formation, the gas-side transfer velocity was reduced by only about 20 % compared to the wind speed, which is considered an upper limit of the reduction, as the shear stress velocity might also be reduced. In contrast, the water-side transfer velocity of anisol was decreased by at least a factor of two. This suggests that gas exchange in water is not directly hindered by the monomolecular film but is instead affected by the reduction in near surface turbulence. Additionally, the influence of ice floes, simulated by floating foam rubber discs, on the gas exchange rate was investigated, revealing a reduction corresponding to the surface coverage.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	UV-Spektroskopie . . . . .	7
2.2	Massentransport durch die Wasseroberfläche . . . . .	8
2.2.1	Fick'sche Gesetze . . . . .	8
2.2.2	Turbulenz . . . . .	9
2.2.3	Transfer . . . . .	10
2.2.4	Schubspannungsgeschwindigkeit . . . . .	12
2.2.5	Grenzschicht und Schmidtzahl . . . . .	13
2.3	Modelle für den Gasaustausch . . . . .	16
2.3.1	Das Filmmodell . . . . .	16
2.3.2	Das Diffusionsmodell . . . . .	17
2.3.3	Das Oberflächenerneuerungsmodell . . . . .	17
2.3.4	Das Deacon-Modell . . . . .	18
2.3.5	Diskussion der Modelle . . . . .	18
2.4	Oberflächenfilme . . . . .	19
2.4.1	Tenside . . . . .	19
2.4.2	Alkohole . . . . .	20
2.4.3	Meereis-Modell . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Aufbau des Experiments</b>	<b>22</b>
3.1	Aeolotron . . . . .	22
3.2	Xenon-Pulslampe . . . . .	24
3.3	UV-Spektrometer . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Methodik</b>	<b>26</b>
4.1	Tracer . . . . .	26
4.2	Spektrenaufnahme . . . . .	26
4.3	Datenverarbeitung . . . . .	28
4.3.1	Referenzspektren . . . . .	28

4.3.2	Fit . . . . .	29
4.4	Invasionsmessung . . . . .	30
4.4.1	Boxmodell . . . . .	30
4.4.2	Durchführung ohne Oberflächenfilme . . . . .	32
4.4.3	Durchführung mit Oberflächenfilmen . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>34</b>
5.1	Auswertung ohne Oberflächenfilm . . . . .	34
5.1.1	Anisol . . . . .	34
5.1.2	2,5-Dimethylpyrazin . . . . .	39
5.1.3	Pyrazin . . . . .	40
5.2	Auswertung mit Oberflächenfilm . . . . .	42
5.2.1	Anisol . . . . .	42
5.2.2	Pyrazin . . . . .	45
5.2.3	2,5-Dimethylpyrazin . . . . .	47
5.3	Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Film . . . . .	48
5.3.1	Hexadecanol . . . . .	49
5.3.2	Olivenöl . . . . .	52
5.3.3	Tergitol . . . . .	55
5.3.4	Meereis-Modell . . . . .	58
5.4	Vergleich der Transfargeschwindigkeiten zu früheren Messungen . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>63</b>
7.1	Messzeiten . . . . .	63
7.2	Ohne Film . . . . .	65
7.3	Mit Film . . . . .	73
7.4	Vergleich mit und ohne Film . . . . .	84
<b>8</b>	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>96</b>

# 1 Motivation

Obwohl Gewässer aller Art eine sehr wichtige Rolle nicht nur für die Menschheit, sondern auch für zahlreiche ökologische und klimatische Prozesse, spielen, sind sie nicht so gut verstanden und erforscht, wie man es vermuten könnte. Vor allem die Gasaustauschprozesse zwischen Gewässern und Luft, insbesondere Ozeane und Atmosphäre ([JK22]) lassen noch einige Fragen unbeantwortet. In besonderem Hinblick auf den Klimawandel und die Eindämmung und Bewältigung dessen Folgen, aber auch in Hinblick auf die Zerstörung der natürlichen Ökosysteme durch Umweltverschmutzung und Überbevölkerung, ist die Erweiterung unseres Verständnisses in diesem Gebiet auf physikalischer und chemischer Ebene enorm wichtig.

Insbesondere der Gasaustauschprozess zwischen Ozeanen und Atmosphäre ist dabei besonders entscheidend ([Woo+19]), da diese fast 70% der Erdoberfläche bedecken. Dies hat zur Folge, dass ein großer Teil des von Menschen ausgestoßenen Kohlenstoffdioxids von den Meeren aufgenommen wird ([MM85]). Effekte wie Oberflächenfilme, Wellen, Blasen und weitere haben dabei einen großen Einfluss auf den Gasaustausch ([AL54], [MF75], [La 62]). Wie groß jedoch wirklich der Einfluss von Oberflächenfilmen auf die Transfargeschwindigkeit ist, ist noch recht unsicher. Frühere Abschätzungen stimmen mit moderneren Resultaten aus Experimenten kaum überein und der Effekt von Oberflächenfilmen scheint wie in [MF75] überschätzt zu sein.

Dabei stellen sie jedoch auch einige Probleme der Forschung dar. Wind-Wellen-Kanäle wie das Heidelberg Aeolotron bieten hierfür die beste Möglichkeit, diese Prozesse und darauf Einfluss nehmende Effekte zu erforschen und besser zu verstehen ([KKr+22]). Am Häufigsten verwendet wird hierbei die Massenbilanzmethode, für die verschiedene Messmöglichkeiten in Frage kommen, wie etwa Ultraviolett-(UV)-Spektroskopie ([Vog06]), Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie ([Kra13]) und Massenspektrometrie ([Mes+15]).

Ziel dieser Arbeit ist den Einfluss vier verschiedener Oberflächenfilme auf die Transfargeschwindigkeiten drei verschiedener Tracer mit unterschiedlichen Kontrollen (wasser- und luftseitig) durch Invasionsmessung zu untersuchen.

## 2 Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die relevante physikalische Theorie gegeben. Es wird auf die Methode der UV-Spektroskopie eingegangen, für diese Arbeit wichtige Transportprozesse und Parameter werden erläutert. Es werden 3 Modelle für den Gasaustausch vorgestellt sowie die Verwendung von Oberflächenfilmen diskutiert. Die Herleitungen sind zu großen Teilen aus [Krä11] und [Küh22].

### 2.1 UV-Spektroskopie

In dieser Arbeit werden Daten im UV-Bereich, welcher sich über  $\lambda = 100 \text{ nm} - 380 \text{ nm}$  streckt, gemessen.

Die UV-Spektroskopie basiert auf dem Prinzip, dass Moleküle bestimmte Wellenlängen des UV-Lichts absorbieren, was zu Übergängen von Elektronen in andere Molekülorbitale führt. In diesem Fall handelt es sich um Übergänge von Valenzelektronen, die auf höhere Energieniveaus angeregt werden. Dies ist festzumachen an dem hier vorliegenden Energiebereich

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot \lambda}{c} = (3,26 - 12,4) \text{ eV}. \quad (2.1)$$

$h$  ist das Plancksche Wirkungsquantum,  $\nu$  die Frequenz des Lichts. Diese Absorption ist charakteristisch für die jeweiligen chemischen Verbindungen und hängt von deren chemischer Struktur ab. Die resultierenden Absorptionsspektren, welche durch den Extinktionskoeffizienten  $\epsilon(\lambda)$  beschrieben werden, können zur Identifikation von Substanzen verwendet werden, indem sie mit bekannten Referenzspektren verglichen werden. Nach dem Lambert-Beerschen Gesetz, welches in Abbildung 2.1 veranschaulicht ist, hängt die Absorption des weiteren von der anfänglichen Lichtintensität  $I_0(\lambda)$ , der Konzentration  $c$  des Stoffes und dem durchlaufenen Weg durch das absorbierende Material  $l$  ab:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\epsilon(\lambda) \cdot c \cdot l}. \quad (2.2)$$

Dabei kann der Exponent der e-Funktion als Absorbanz  $A$

$$A(\lambda) = \epsilon(\lambda) \cdot c \cdot l \quad (2.3)$$

zusammengefasst werden. Bei mehreren Stoffen addieren sich die Absorbanzen linear. Durch Umformung von Gleichung 2.1 ergibt sich weiter



$$A(\lambda) = -\ln\left(\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}\right) = \ln\left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}\right). \quad (2.4)$$

Aus Gleichungen 2.3 und 2.4 kann nun die Konzentration berechnet werden

$$c = \ln\left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}\right) \frac{1}{\epsilon(\lambda) \cdot l} \quad (2.5)$$

gegeben  $l$  und  $\epsilon(\lambda)$  sind bekannt.

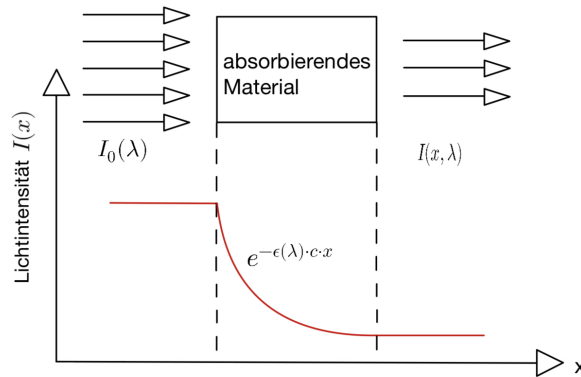


Abbildung 2.1: Darstellung des Lambert-Beerschen Gesetzes: Trifft Licht mit einer Intensität von  $I_0(\lambda)$  auf absorbierendes Material, fällt die Intensität im Material exponentiell ab

## 2.2 Massentransport durch die Wasseroberfläche

### 2.2.1 Fick'sche Gesetze

Teilchen führen zufällige thermische Bewegungen aus. Durch diese Bewegungen entsteht ein Fluss  $\vec{j}$  von Bereichen mit hoher Konzentration zu Bereichen mit niedriger Konzentration, der durch das erste Fick'sche Gesetz,

$$\vec{j} = -D\nabla c, \quad (2.6)$$

beschrieben wird.  $D$  ist dabei die Diffusionskonstante, die von der Temperatur und dem verwendeten Medium abhängt. Das erste Fick'sche Gesetz beschreibt somit den Diffusionsfluss.

Lassen es die Bedingungen zu, indem es keine Quellen oder Verluste gibt, und die Teilchenanzahl kann als konstant angesehen werden, kann daraus die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{dc}{dt} = -\nabla \vec{j} \quad (2.7)$$

gefolgert werden. Mit dem ersten Fick'schen Gesetz folgt nun das zweite Fick'sche Gesetz

$$\frac{dc}{dt} = D\nabla^2 c = D\Delta c, \quad (2.8)$$

welches auch als Diffusionsgleichung bezeichnet wird.

Teilt man die totalen Ableitungen des zweiten Fick'schen Gesetzes in seine partialen Ableitungen auf, erhält man die Transportgleichung

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{dc}{dt} - \vec{v}\nabla c = D\Delta c - \vec{u}\nabla c. \quad (2.9)$$

$\vec{v}$  beschreibt das Strömungsfeld. Die Transportgleichung kann jedoch nur selten genutzt werden, da hierfür das Strömungsfeld zu jedem Zeitpunkt sehr gut bekannt sein muss.

### 2.2.2 Turbulenz

Turbulenzen sind Fluktuationen und Verwirbelungen, welche Konzentrationsunterschiede ausgleichen können. Da diese in ihrer Intensität und Richtung nicht zwingend konstant sind, verwendet man die Reynolds-Aufspaltung, um diese Fluktuationen zu beschreiben. Dabei wird eine Größe  $x(t)$  in ihren Mittelwert  $\bar{x}$  und eine Fluktuation  $x'(t)$  um diesen Mittelwert aufgeteilt. Für die die Strömung  $\vec{v}(t)$  und die Konzentration  $c(t)$  gelten damit

$$\vec{v}(t) = \bar{\vec{v}} + \vec{v}' \quad \text{mit} \quad \bar{\vec{v}} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T \vec{v}(t) dt, \quad (2.10)$$

$$c(t) = \bar{c} + c' \quad \text{mit} \quad \bar{c} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T c(t) dt. \quad (2.11)$$

Für die zeitlichen Mittelwerte gilt zudem

$$\bar{\vec{v}'} = 0 = \bar{c}' \quad (2.12)$$

Damit lässt sich die Flussdichte  $\vec{j}$  wie folgt ausdrücken

$$\vec{j} = c \cdot \vec{v} = (\bar{c} + c')(\bar{\vec{v}} + \vec{v}'), \quad (2.13)$$

was den zeitlichen Mittelwert

$$\bar{\vec{j}} = \overline{(\bar{c} + c')(\bar{\vec{v}} + \vec{v}')} = \bar{c}\bar{\vec{v}} + \overline{c'\vec{v}'} = \bar{c}\bar{\vec{v}} + \overline{c'\vec{v}'}, \quad (2.14)$$

$$\overline{c'\vec{v}'} = 0 = \overline{c'\bar{\vec{v}}}, \quad (2.15)$$

liefert. Der erste Term  $\bar{c}\bar{\vec{v}}$  beschreibt den advektiven Transport (Transport durch mittlere Strömung), der zweite Term  $\overline{c'\vec{v}'}$  beschreibt den turbulenten Transport.

Unter zusätzlicher Berücksichtigung des 1. Fick'schen Gesetzes (Gleichung 2.6), indem man den Term für molekulare Diffusion addiert, erhält man die allgemeine Transportgleichung

$$\bar{\vec{j}} = \bar{c}\bar{\vec{v}} + \overline{c'\vec{v}'} - D\nabla\bar{c}. \quad (2.16)$$

Nun kann analog zur Diffusionskonstante der turbulente Diffusionskoeffizient  $K_t$  definiert werden

$$-K_t\nabla\bar{c} := \overline{c'\vec{v}'}, \quad (2.17)$$

womit sich

$$\bar{\vec{j}} = \bar{c}\bar{\vec{v}} - K_t\nabla\bar{c} - D\nabla\bar{c} \quad (2.18)$$

ergibt. Diese Gleichung beschreibt die mittlere Flussdichte.

### 2.2.3 Transfer

Im Folgenden wird festgelegt, dass die Wasseroberfläche in der x-y-Ebene liegt. Des weiteren wird angenommen, dass Luft und Wasser in horizontaler Richtung gut gemischt sind und sich somit ein eindimensionaler Konzentrationsgradient in z-Richtung ausbildet. Die Fick'schen Gesetze (Gleichungen 2.6 und 2.8), die Transportgleichung (Gleichung 2.9) und die Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2.7) werden somit auf eine Dimension reduziert

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial z} \quad \text{1. Fick'sches Gesetz,} \quad (2.19)$$

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{\partial^2 c}{\partial t^2} \quad \text{2. Fick'sches Gesetz,} \quad (2.20)$$

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{\partial j}{\partial z} \quad \text{Kontinuitätsgleichung,} \quad (2.21)$$

$$\bar{j} = -(K_t(z) + D) \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad \text{Transportgleichung,} \quad (2.22)$$

wobei damit auch die Advektion aus der Transportgleichung verfällt. Stellt man diese Gleichung nach der Konzentration um und integriert sie (ausführlichere Ausführung in [Krä11]), erhält man den Transferwiderstand

$$R := \frac{\Delta c}{j} = \frac{1}{k}. \quad (2.23)$$

Die Geschwindigkeit des Gasaustausches

$$k = \frac{1}{R} \quad (2.24)$$

ist als Kehrwert des Transferwiderstandes definiert. Anschaulich kann sie als die Geschwindigkeit aufgefasst werden, mit der ein Kolben die Konzentration durch die Grenzschicht drücken müsste, um den betreffenden Fluss aufrechtzuerhalten.

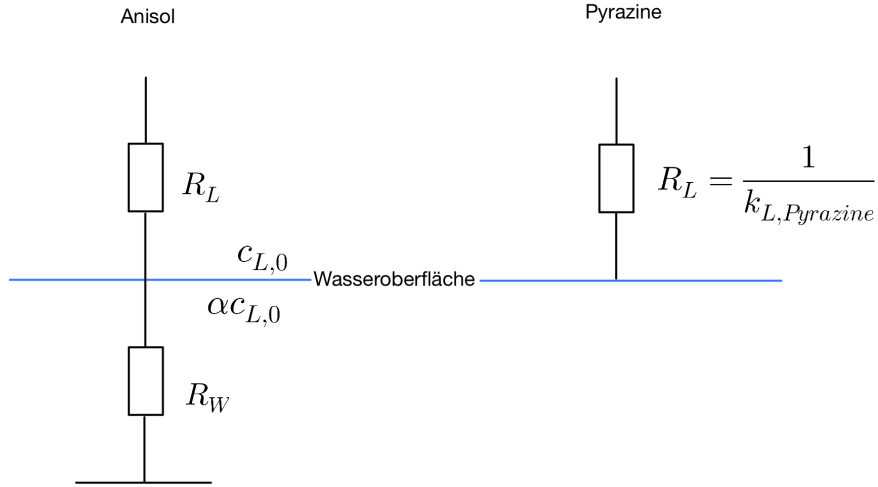


Abbildung 2.2: Aufteilung des Transferwiderstandes im Fall von wasserseitig kontrollierten Stoffen (Anisol) im Vergleich zu luftseitig kontrollierten (Pyrazin und 2,5-Dimethylpyrazin)

Im Fall von wasserseitig kontrollierten Stoffen (wie hier Anisol), teilt sich der Transferwiderstand in zwei Komponenten auf, den Widerstand in der Luft  $R_L$  und den Widerstand im Wasser  $R_W$  (siehe Abbildung 2.2)

$$R_{\text{ges}} = R_L + \frac{R_W}{\alpha} \quad (2.25)$$

(ausführliche Erklärungen und Herleitungen sind [Krä11] und [Fri20] zu entnehmen). Da gilt

$$R_{L,\text{Anisol}} \approx R_{L,\text{Pyrazine}} \quad (2.26)$$

$$R_{\text{ges}} = \frac{1}{k_{L,\text{Anisol}}}, \quad (2.27)$$

lässt sich somit der wasserseitige Transferwiderstand  $R_W$  von Anisol bestimmen.

#### 2.2.4 Schubspannungsgeschwindigkeit

Betrachtet man eine eindimensionale Strömung in x-Richtung, lässt sich auch für den Impuls analog zu Gleichung 2.22 eine Transportgleichung definieren,

$$\bar{j}_m = -\rho(K_{m,t}(z) + \nu) \frac{\partial \bar{u}(z)}{\partial z} = -\rho\nu \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} + \rho(\overline{u'_x u'_z}). \quad (2.28)$$

$\rho$  und  $\nu$  sind dabei jeweils die Dichte und kinematische Viskosität.  $K_{m,t}$  ist dabei weiter nach Gleichung 2.17 definiert. Der erste Term beschreibt die molekulare Diffusion, der zweite Term beschreibt die Turbulenz, welcher auch als Schubspannung bekannt ist. Die Schubspannung ist nach Gleichung 2.28 definiert als

$$\tau := j_m = \overline{\rho u'_x u'_z} := \rho u_*^2. \quad (2.29)$$

$u_*$  ist dabei die Schubspannungsgeschwindigkeit, welche sich aus

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2.30)$$

ergibt und angibt, wie schnell der Impuls durch die Grenzfläche transportiert wird.

### 2.2.5 Grenzschicht und Schmidtzahl

An der Wasseroberfläche können die Wirbel die Phasengrenze nicht durchqueren und werden immer kleiner. Das bedeutet, die Turbulenz kann vernachlässigt werden und es folgt aus Gleichung 2.22

$$\bar{j} = -D \left. \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (2.31)$$

Über diese Gleichung können die üblichen Längenskalen definiert werden. Aus dem Konzentrationsunterschied  $\Delta c = c_O - c_W$  aus Wasseroberfläche  $c_O$  und gut durchmischtem Wasser  $c_W$  kann die Gleichung umgeschrieben werden zu

$$j = -D \frac{\Delta c}{z_*} = k \cdot \Delta c. \quad (2.32)$$

$z_*$  ist die Grenzschichtdicke,

$$z_* = DR, \quad (2.33)$$

Diese Dicke ist definiert als Überlagerung zwischen dem Konzentrationsgradienten der Grenzfläche und der Bulk-Konzentration  $c_L$  bzw.  $c_W$  (siehe Abbildung 2.3). An Gleichung 2.28 ist nun zu erkennen, dass die Flussdichte  $j$  proportional zur Konzentrationsdifferenz  $\Delta c$  ist mit dem Proportionalitätsfaktor  $k$ , der Transfargeschwindigkeit. Da die Diffusion im Wasser deutlich langsamer vorangeht als in der Luft, sind die Schichten in den beiden Medien unterschiedlich dick. Durch die höhere Dichte des Wassers und die damit kleinere Diffusionskonstante folgen dünnere Grenzschichten (siehe Abbildung 2.3).

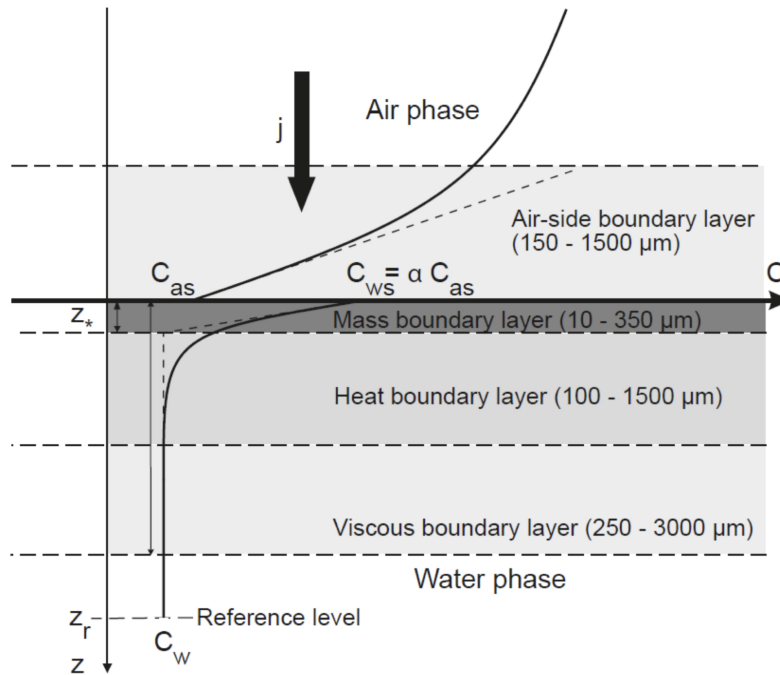


Abbildung 2.3: Darstellung der wasser- und luftseitigen Grenzschichten mit Konzentrationsprofil eines Stoffes mit Löslichkeit  $\alpha > 1$ , aus [KJ18]

Das Verhältnis zwischen der molekularen Diffusionskonstante  $D$  und der kinematischen Viskosität  $\nu$ , also zwischen Massen- und Impulstransport, nennt man Schmidtzahl

$$Sc = \frac{\nu}{D}. \quad (2.34)$$

Sie wird in Kapitel 2.3 verwendet. Die Schmidtzahl ändert sich zwischen Wasser und Luft aufgrund der unterschiedlichen Diffusionskonstanten und Viskositäten.

Eine weitere wichtige Größe hierfür ist die Löslichkeit  $\alpha$ , welche unter anderem der Aufteilung des Transferwiderstandes in Luft- und Wasserseite verwendet wird. Da die Tracer auf Luft und Wasser aufgeteilt sind, gilt das Henry-Gesetz

$$c_w = \alpha \cdot c_L. \quad (2.35)$$

Dies gilt im Falle eines Gleichgewichts, wenn der Nettofluss zwischen Luft und Wasser gleich Null ist, sich die Konzentrationen in Luft und Wasser also nicht mehr ändern. Das Henry-Gesetz gilt jedoch immer an der Wasseroberfläche (siehe Konzentrationsverlauf in Abbildung 2.3).

In Abbildung 2.4 ist die Schmidtzahl in Wasser gegen die Löslichkeit in Wasser aufgetragen. Unter anderem

ist das hier verwendete Anisol eingetragen.

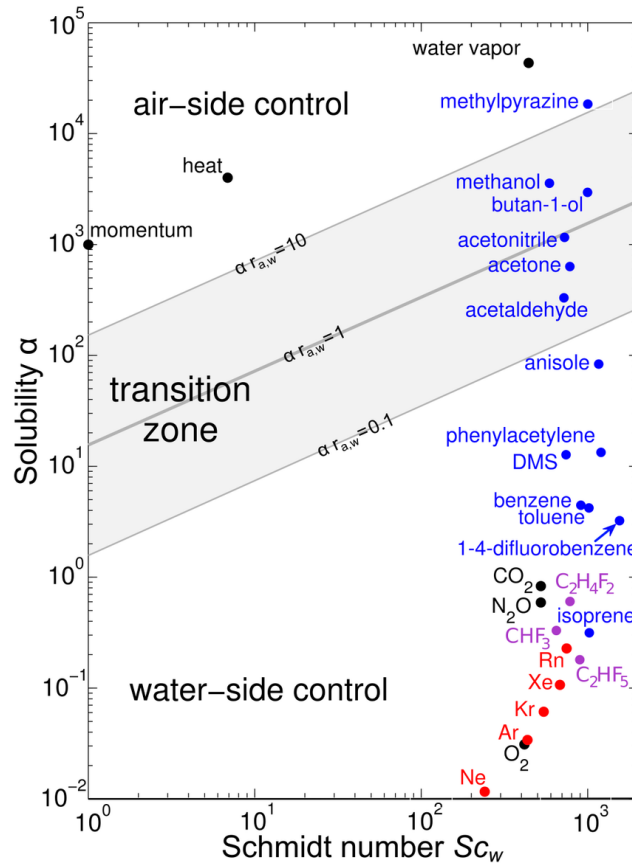


Abbildung 2.4: Löslichkeiten  $\alpha$  über wasserseitigen Schmidtzahlen  $Sc$ , die obere Gerade markiert die 10 % luftseitige Kontrolle, die untere Gerade die 90% wasserseitige Kontrolle, aus [Jäh19]

Abbildung 2.5 zeigt eine logarithmische Darstellung von Transferwiderstand  $R$  und Transfargeschwindigkeit  $k$  für verschiedene Schichten im Wasser und in der Luft.



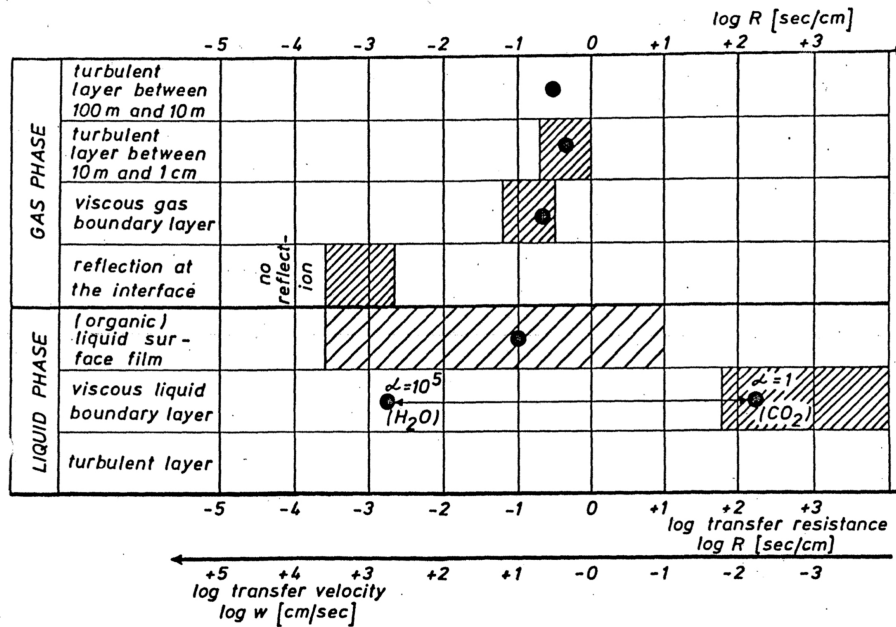


Abbildung 2.5: Logarithmische Darstellung des Übertragungswiderstandes  $R$  und der Übertragungsgeschwindigkeit  $k$  einzelner Schichten in der Gasphase und in der Flüssigphase sowie ihre relative Bedeutung, repräsentative Werte sind durch Punkte gekennzeichnet, die schattierten Bereiche geben einen Eindruck des zu erwartenden Bereichs, aus [MF75]

## 2.3 Modelle für den Gasaustausch

### 2.3.1 Das Filmmodell

Das Filmmodell ist das einfachste der Modell, da es annimmt, der Transport von Gasen an der Grenzschicht sei diffusiv und sonst außerhalb turbulent. Dabei wird angenommen, dass die Granzschicht eine dünne Schicht direkt unterhalb der Wasseroberfläche ist. Der Transport ist dabei nur in  $z$ -Richtung möglich und die entstehenden Wirbel können nicht in die Grenzschicht eindringen, wodurch in der Grenzschicht ein lineares Konzentrationsprofil entsteht. Dadurch kann die Grenzschicht als eine Art stehender Film zwischen Luft- und Wasserraum aufgefasst werden.

Unter dieser Definition können die Geschwindigkeit  $u_+$ , die Grenzschichtdicke  $z_+$  und die Transferegeschwindigkeit  $k_+$  als

$$u_+ := \frac{u}{u_*}, \quad (2.36)$$

$$z_+ := \frac{u_* z}{\nu}, \quad (2.37)$$

$$k_+ := \frac{k}{u_*} \quad (2.38)$$

definiert werden. Für den Transferwiderstand ergibt sich mit Gleichung 2.23 und der Schmidtzahl (Gleichung 2.34)

$$R = \frac{1}{k} = \frac{z_*}{D} = \frac{z_+ \nu}{D u_*} = \frac{z_+}{D} Sc. \quad (2.39)$$

Aus experimentellen Ergebnissen ging hervor, dass die Transferwiderstände, die diesem Modell nach berechnet wurden, zu groß waren. Das heißt, der Exponent von -1 der Schmidtzahl für die Berechnung von  $k$  ist zu gering, was zu geringe Transfargeschwindigkeiten zur Folge hat. Dies zeigt, dass die Annahme, die Turbulenzen hätten keinen Einfluss auf die Grenzschicht, nicht stimmen kann. Es kann jedoch als untere Grenze für Transfargeschwindigkeiten gesehen werden.

### 2.3.2 Das Diffusionsmodell

Beim Diffusionsmodell wird angenommen, dass es eine Schicht zwischen Diffusion und Turbulenz gibt, in der es Wirbel gibt und somit beide Prozesse relevant sind. Diese Wirbel werden kleiner, je näher sie der Grenzfläche kommen. Für den Massentransport sorgt primär Diffusion, für den Impulstransport Turbulenz.

Für glatte Oberflächen ergibt sich nach [Dea77]

$$\frac{1}{k_+} = 12.1 \cdot Sc^{\frac{2}{3}} + 2.7 \cdot \log_{10} Sc + 2.9 \quad (2.40)$$

bei Gasen mit  $Sc > 10$ .

### 2.3.3 Das Oberflächenerneuerungsmodell

Dieses Modell nimmt Pakete aus Turbulenzen an, die für eine bestimmte Dauer  $\tau$  an der Oberfläche verweilen, bis sie in die Grenzschicht eindringen. Diese Dauer hängt von der Tiefe ab und beschreibt des Weiteren auch die Zeit zwischen zwei Wirbeln, die diese benötigen, um aus dem gut gemischten Wasser die jeweilige Grenzschichttiefe zu erreichen.

Die Transfergeschwindigkeit  $k$  kann nach [Jäh+89] durch

$$k = \frac{u_*}{\beta_p} \cdot Sc^{-1 + \frac{1}{p+2}} \quad (2.41)$$

ausgedrückt werden.  $p > 0$  ist ein Parameter,  $\beta_p$  ist ein dimensionsloser Proportionalitätsfaktor, der experimentell bestimmt wird.

Für raue bzw. wellenbewegte Oberflächen ergibt sich  $k \propto Sc^{-\frac{1}{2}}$ , für glatte Oberflächen gilt  $k \propto Sc^{-\frac{2}{3}}$ .

### 2.3.4 Das Deacon-Modell

Die Herleitung dieses Modells stammt aus [Fri20].

Wendet man Reichardts Parametrisierung der turbulenten Viskosität auf die turbulente Diffusion an, erhält man

$$K(z^+) = \kappa\nu \left( z^+ - z_*^+ \tanh \frac{z^+}{z_*^+} \right). \quad (2.42)$$

$z^+$  ist dimensionslos.  $z_*$  ist hierbei nach Gleichung 2.33 definiert. Es wird angenommen, dass sie den selben Wert hat wie die fluiddynamische Granzschicht  $z_1$ , was für Tracer mit einer Schmidtzahl um 1 für Luft sinnvoll ist. Die turbulente Impulsübertragung wird als gleichwertig zur turbulenten Übertragung von Masse betrachtet. Das Konzentrationsprofil wird durch die Anwendung des Diffusionskoeffizienten in eine Gleichung abgeleitet, die die Konzentration  $c(z)$  beschreibt. Da diese Formel für  $z^+ \leq 50$  gilt, kann die dimensionslose Konzentration durch Normierung auf die Konzantration bei  $z^+ = 50$  definiert werden:

$$c^+(z^+) = \frac{c(z^+) - c_s}{c(z^+ = 50) - c_s}. \quad (2.43)$$

$c_s = c(0)$  ist die Konzentration an der Wasseroberfläche. Für die Transfergeschwindigkeit kann über Gleichung 2.31 mit Integration von  $z^+ = 0$  bis 50 die folgende Proportionalität für  $0,6 < Sc < 10$  mit einer Genauigkeit von 1 % bestimmt werden:

$$k = \frac{u_*}{15,2} Sc^{-0,61}. \quad (2.44)$$

### 2.3.5 Diskussion der Modelle

Durch das Filmmodell ist eine obere Grenze für den Transferwiderstand bzw. eine untere Grenze für die Gastransfergeschwindigkeit gegeben. Sowohl mit dem Diffusions- als auch dem Oberflächenerneuerungsmodell

können Transfargeschwindigkeiten für die Grenzfälle einer glatten und einer rauen Oberfläche bestimmt werden. Allgemein ergibt sich daraus

$$k = \frac{u_*}{\beta_n} \cdot Sc^{-n}, \quad (2.45)$$

mit  $n = \frac{2}{3}$  für glatte Oberflächen und  $n = \frac{1}{2}$  für wellenbewegte Oberflächen, wobei es einen Übergangsbereich zwischen den beiden Grenzfällen gibt.

Somit ist es auch möglich die Transfargeschwindigkeiten zweier Tracer unter gleichen Bedingungen zu vergleichen,

$$\frac{k_1}{k_2} = \left( \frac{Sc_1}{Sc_2} \right)^{-n}. \quad (2.46)$$

## 2.4 Oberflächenfilme

Oberflächenfilme sind Substanzen, die sich auf der Wasseroberfläche absetzen. Diese Filme haben die Eigenschaft, die Wellenbildung zu dämpfen, teilweise sogar ganz zu unterdrücken. Sie entstehen auf Gewässern auf natürliche Art durch beispielsweise Plankton oder Bakterien, die diese produzieren, sie können aber auch durch Menschen durch beispielsweise Öle verursacht werden. Oberflächenfilme bestehen in der Regel aus einer hydrophoben und einer hydrophilen Gruppe und haben eine längliche Form. Der hydrophobe Teil ist seinem Namen entsprechend wasserabweisend und ragt aus der Wasseroberfläche, der hydrophile Teil richtet sich ins Wasser (siehe Abbildung 2.5). Die Moleküle lagern sich so lange an der Wasseroberfläche ab, bis diese gleichmäßig mit einem monomolekularen Film bedeckt ist.

Bei Wellenbildung werden die Wellenberge gedehnt und die Wellenberge gestreckt ([Voi19]). Die Filme werden mit den Wellen gedehnt und gestaucht, wodurch Kräfte entstehen, die den Wellen entgegenwirken ([Fre+95]).

### 2.4.1 Tenside

Das besondere an Tensiden ist, dass, ist eine gewisse Konzentration erreicht, die restlichen Moleküle sich zu Mizellen ausbilden (siehe Abbildung 2.4).

In dieser Arbeit wurde Tergitol 15-S-12 verwendet, welches im weiteren Verlauf nur als Tergitol bezeichnet wird. Tergitol ist nichtionogen, hat eine Dichte von  $\rho = 1,026 \frac{g}{mL}$  (bei  $20^\circ C$ ) und eine kritischen Mizellenbildung ab 104 ppm (bei  $25^\circ C$ ).

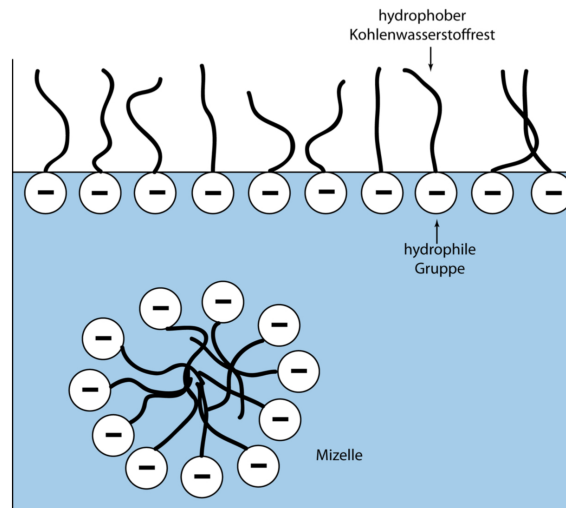


Abbildung 2.6: Tensid lagert sich an der glatten Wasseroberfläche an, bis kritische Konzentration erreicht wird, danach bilden sich Mizellen [Sta10]

In der Vergangenheit wurde Triton-X-100 statt Tergitol verwendet. Da Tergitol jedoch deutlich umweltverträglicher und in seinen Eigenschaften Triton-X-100 sehr ähnlich ist, wird es heute statt Triton-X-100 verwendet.

### 2.4.2 Alkohole

Im Vergleich zu Tensiden bilden alkohol- oder ölbasierte Filme ebenfalls monomolekulare Filme auf der Wasseroberfläche aus, jedoch bilden sie keine Mizellen.

Zum einen wurde Hexadecanol, ein Fettalkohol, verwendet. Es hat die chemische Summenformel  $C_{16}H_{34}O$ , eine molare Masse von  $242.44 \frac{g}{mol}$  und eine Dichte von  $\rho = 0.84 \frac{g}{cm^3}$  ([Arb]).

Als weiterer Oberflächenfilm wurde Olivenöl verwendet. Es hat im Durchschnitt eine Dichte von  $\rho = 0.914 - 0.919 \frac{g}{cm^3}$  ([Kam24]).

### 2.4.3 Meereis-Modell

Weitere Messungen wurden mit dem Meereis-Modell vorgenommen. Im Vergleich zu den anderen Filmsubstanzen handelt es sich hierbei um Festkörper. Es besteht aus gummiartigen, runden Schollen, die auf der Wasseroberfläche schwimmen. Sie haben einen Durchmesser von  $d = 7 \text{ cm}$ , eine Höhe von  $h = 1 \text{ cm}$  und im Durchschnitt ein Gewicht von  $m = 28,815 \text{ g}$ . Dies bedeutet eine Kreisfläche von  $A = 38,4845 \text{ cm}^2$ , ein

Volumen von  $V = 38,4845 \text{ cm}^3$  und somit eine Dichte von  $\rho = 0,7488 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ .

Im Experiment wurden drei Messungen mit dem Meereis-Modell mit drei verschiedenen Mengen an Schollen durchgeführt. Die Wasseroberfläche beträgt  $A_W = 18 \text{ m}^2$ . Unter der Annahme, dass keine der Schollen sich überlagern, liegt die maximale Bedeckung der Wasseroberfläche bei 100 Schollen bei 2,14%, bei 700 Schollen bei 14,97% und bei 1705 Schollen bei 36,45%. In der Realität sind diese Werte noch geringer, da sich die Schollen verschieden überlagern.

Im weiteren wird das Meereis-Modell mit den Oberflächenfilmen ausgewertet, auch wenn es kein Oberflächenfilm ist.

### 3 Aufbau des Experiments

In diesem Kapitel wird zunächst der allgemeine Aufbau des Heidelberg Aeolotrons, an dem die Messungen durchgeführt wurden, erläutert. Anschließend werden die für die Experimente verwendete Lampe sowie das luftseitige und wasserseitige UV-Spektrometer beschrieben.

#### 3.1 Aeolotron

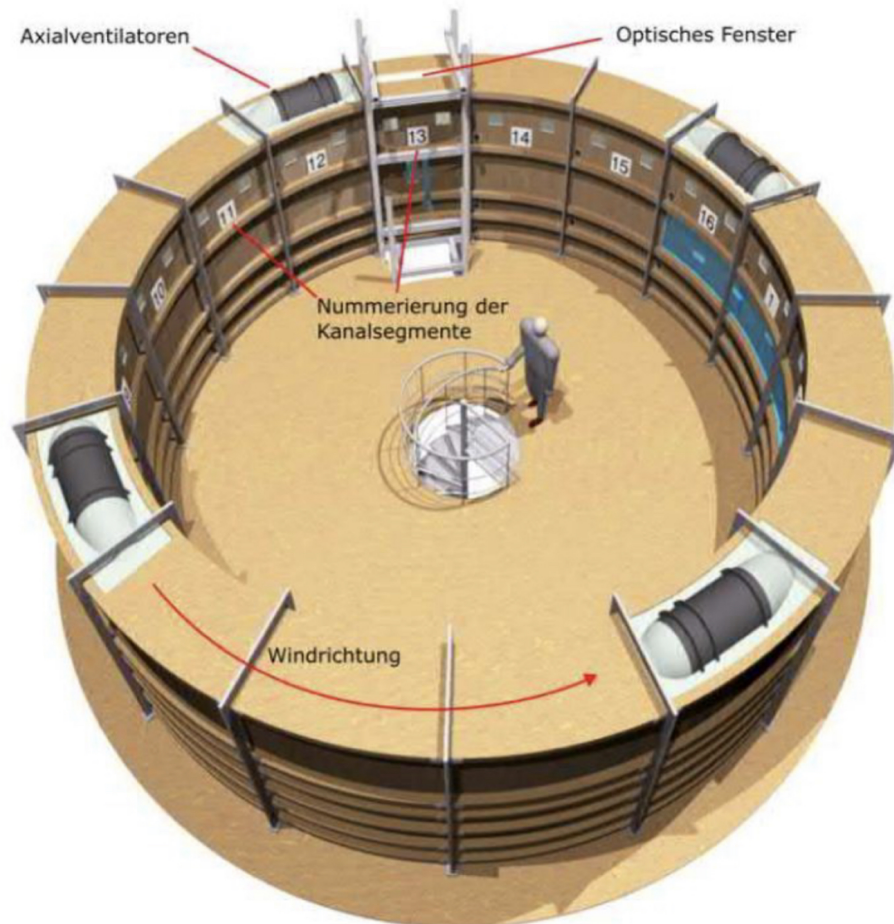


Abbildung 3.1: Gerenderte Ansicht des Aeolotron, die Abbildung stammt aus [Kra13] und wurde modifiziert

Das Heidelberg Aeolotron, ein ringförmiger Wind-Wellen-Kanal, siehe Abbildung 3.1, hat eine Weite von  $(61,67 \pm 0,37)$  cm (auf einer Höhe von 1m), eine Höhe von  $(240,34 \pm 0,36)$  cm und einen Innenseitenumfang von 27,3 m (ebenfalls auf 1m Höhe). Es besteht aus einem ringförmigen Wasserkanal, der bei der Durchführung

von Experimenten eine Wassertiefe von näherungsweise 1.0 m aufweist. Die Wasseroberfläche beträgt hier  $(17,9845 \pm 0,1574) \text{ m}^2$ . Dies entspricht einem Wasservolumen von knapp  $18,25 \pm 0,39 \text{ m}^3$  (auf Wasserhöhe der Messungen), was zu einem Luftvolumen von  $24,4 \text{ m}^3$  führt. Der Kanal ist in 16 nummerierte Segmente unterteilt. Der Wind im Kanal wird durch 4 Axialventilatoren erzeugt, die um  $90^\circ$  voneinander versetzt sind und sich in den Segmenten 4, 8, 12 und 16 befinden. Die Eingabe der Windgeschwindigkeit der Ventilatoren ist in Hz, weshalb alle Windgeschwindigkeiten in Hz angegeben sind. Die Umweltfaktoren des Kanals, welche die Windgeschwindigkeit in  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  beinhalten, wurden während der Messungen mitgemessen, müssen jedoch noch ausgewertet werden. In Segment 13 befindet sich ein optisches Fenster, durch welches Messgeräte wie Laser in den Kanal gerichtet werden können. Weitere Informationen können [Kra13] und [KJ] entnommen werden.

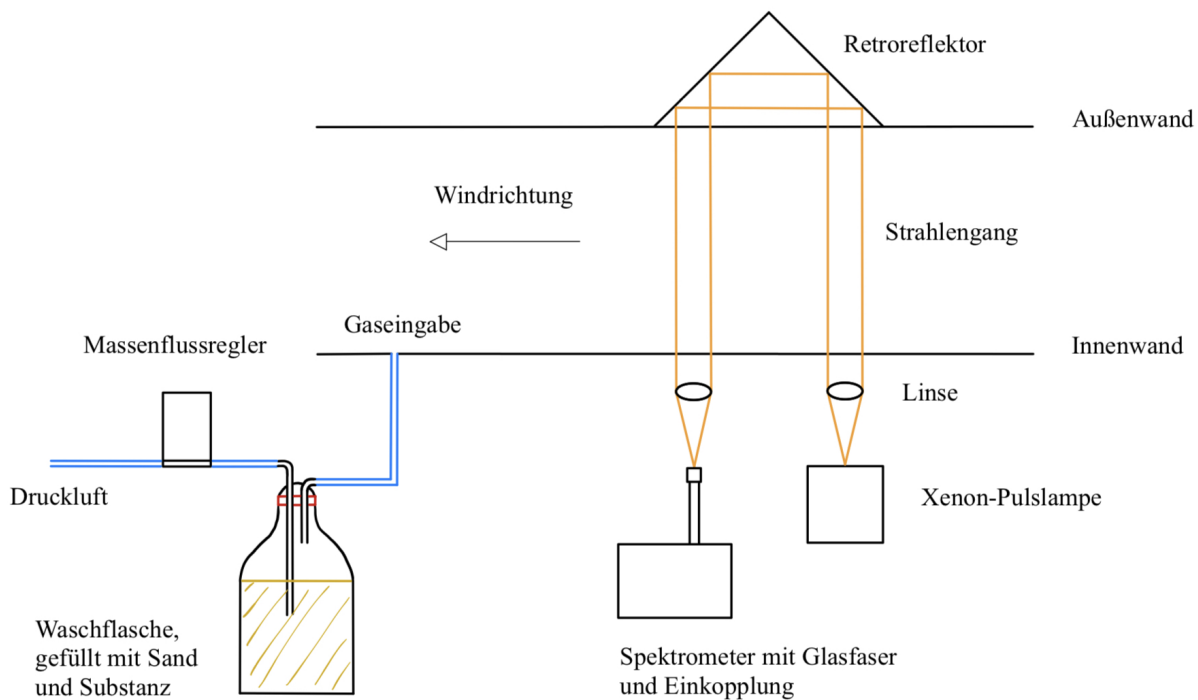


Abbildung 3.2: Messaufbau am Aeolotron, Querschnitt durch den Kanal, die Krümmung wurde zur Vereinfachung weggelassen. Der optische Aufbau sowie die Probe befinden sich außerhalb des Kanals. Die Substanzen werden mit Sand gemischt in eine gläserne Waschflasche gefüllt, über die mit Hilfe eines Messflussreglers Druckluft geführt wird, wodurch die Eingabe in den Luftraum erfolgt. Zur gleichzeitigen Eingabe der 3 verwendeten Substanzen wurden 2 weitere äquivalente Aufbauten verwendet, die parallel betrieben wurden.

Abbildung 3.2 zeigt einen schematischen Aufbau der Messung. Der optische Aufbau sowie die Proben befinden sich außerhalb des Kanals im inneren Kreis des Aeolotrons (siehe Abbildung 3.1, der Teil in dem



der Mensch abgebildet ist). Das Licht der Xenon-Pulslampe wird durch Retroreflektoren an der Außenwand reflektiert.

Die Gaseingabe erfolgt an der Innenwand des Kanals. Da 3 Substanzen gleichzeitig eingegeben werden, wurde der Aufbau so erweitert, dass die Druckluft 3 Massenflussregler parallel durchströmt. Die maximale Eingabemenge der Massenflussregler beträgt  $j_{V,1} = 1 \frac{l}{min}$  und  $j_{V,2/3} = 20 \frac{l}{min}$ . Jeder der Massenflussregler wird an eine Waschflasche angeschlossen, die mit Sand und der zu messenden Substanz gefüllt ist. Die  $CO_2$  freie, getrocknete Druckluft wird dann mittig im unteren Bereich der Flasche eingeführt und steigt dann durch das Sandgemisch auf. Die Eingabe erfolgt gleichzeitig über 3 unterschiedliche Eingänge in den Kanal über einen Schlauch, der am oberen Teil der Waschflasche befestigt ist. Um die Temperatur der Waschflaschen konstanter zu halten, wurden diese in einen Eimer mit Wasser gestellt.

## 3.2 Xenon-Pulslampe

Die Informationen hierzu stammen aus [Küh22].

Die Xenonpulslampe des Typs L13651-01 von Hamamatsu Photonics K. K., Hamamatsu City, Japan, war für die Messungen am Aeolotron geeignet. Sie besitzt eine kompakte Bauform von  $42 \times 42 \times 34 \text{ mm}^3$  und kann mit einer Frequenz von bis zu 1250 Hz betrieben werden. Nach Angaben des Herstellers erreicht die Lampe eine maximale Leistung von 2 W und eine Stabilität von 2,0%.

Es ist wichtig, dass die maximale Leistung nicht überschritten wird. Die Leistung kann wie folgt berechnet werden:

$$P = E \cdot f = 12C \cdot U^2 \cdot f, \quad (3.1)$$

wobei E die Energie pro Impuls und f die Frequenz der Lichtpulse beschreibt. Das verwendete Modell hat eine Hauptentladungs-Kapazität von  $C = 0,141 \mu F$ . Die Lampe kann bei internen Spannungen von  $U = 300-600 \text{ V}$  betrieben werden. Die Spannung kann manuell oder durch ein eingesetztes Signal eingestellt werden.

Für unsere Messungen an der Messzelle wurde die Lampe bei maximaler internen Spannung  $U = 600 \text{ V}$  und einer Frequenz von  $f = 50 \text{ Hz}$  betrieben. Die Triggerung der Lichtpulse erfolgte über eine Rechteckspannung mit der gleichen Frequenz, generiert durch einen Funktionsgenerator.

### 3.3 UV-Spektrometer

Das hier verwendete Spektrometer Maya 2000Pro von Ocean Insight basiert auf der Rasterkanntechnik. Es misst die Ausbreitung von Licht im Bereich von 189,67-295,02 *nm* mit 2068 Pixeln und erreicht somit eine Auflösung von 0,05 *nm*. Das Spektrometer bietet eine flexible Integrationszeit und kann auf verschiedene Wellenlängen eingestellt werden.

Im Inneren befindet sich ein optisches Gitter, welches das zu messende Licht aufspaltet. Die aufgetrennten Wellenlängen werden durch eine Reihe CCD-Detektoren aufgenommen, die die Intensität des aufgetretenen Lichts messen. Die gemessenen Intensitäten werden mit dem intern ertsellten Programm Heurisko ausgelesen.

## 4 Methodik

In diesem Kapitel werden die verschiedenen getesteten und verwendeten Tracer angegeben sowie die Messmethoden für die Luft- und Wasserseite erläutert. Desweiteren werden die jeweiligen Aufnahmen und Weiterverarbeitungen der Spektren erklärt sowie die dafür notwendige Methode der Invasionsmessung.

### 4.1 Tracer

Zunächst wurden 5 Tracer (Anisol, Pyrazin, Pyridin, Methylpyrazin, Dimethylpyrazin) einzeln nach einander in den Kanal gegeben, um luftseitige Referenzspektren aufzunehmen und um eine Auswahl für die späteren Messungen zu treffen. Bei diesen Messungen befand sich kein Wasser im Kanal. Für die weiteren Messungen wurden die Tracer auf Anisol, Pyrazin und Dimethylpyrazin beschränkt. Einige wichtige Eigenschaften der Tracer sind in Tabelle 1 gelistet.

Tracer	Molare Masse	Löslichkeit $\alpha$	Sättigungsdampfdruck	Diffusionskonstante D in Wasser bei 25°C [ $10^{-5} \frac{cm^2}{s}$ ]	Diffusionskonstante D in Luft bei 25°C [ $\frac{cm^2}{s}$ ]
Einheiten	$\frac{g}{mol}$		kPa		
Anisol	108.14	72	1.33 <sup>[1]</sup>	0.848	0.073
Pyrazin	80.088	-	1.51 <sup>[3]</sup>	-	-
2,5-Dimethylpyrazin	108.141	17601	0.20 <sup>[2]</sup>	-	-

Tabelle 1: Verwendete Tracer mit relevanten Eigenschaften, die Werte der molaren Masse stammen aus [Hay16]; Sättigungsdampfdrücke nach [1] Sicherheitsdatenblatt Anisol(Thermo Fisher Scientific, Waltham, Massachusetts, United States) für 42.2°C, [2] Haz-Map Database(Information on Hazardous Chemicals and Occupational Diseases, 2,5- Dimethylpyrazine) bei 20-25°C, [3] aus [Ver+12] bei 25 °C ; Löslichkeiten bei 25 °C nach [San15]; Diffusionskonstanten bei 25 °C nach [Yaw95]

Pyrazin ist im Vergleich zu Anisol und 2,5-Dimethylpyrazin ein Feststoff. Um bestmögliche Messergebnisse zu erzielen, wurde Pyrazin als Lösung in VE-Wasser im Verhältnis 1:1 angerührt und verwendet. In diesem Mischverhältnis erhält man nach [Pfa44] eine azeotrope Mischung, die bei Verdampfen ihre Zusammensetzung nicht verändert.

### 4.2 Spektrenaufnahme

Zur Aufnahme der Daten wurde das Programm Heurisko verwendet. Jenes nimmt in 10 Sekunden jeweils 100 Spektren auf, die in einem Datenpaket, der '.raw'-Datei, zusammengefasst werden. So erhält man nach jeder Minute einer Messung 6 Dateien, die jeweils 100 Spektren beinhalten, also insgesamt 600 Spektren pro

Minute.

Zu Beginn jeder Messung werden zunächst mindestens 3000 Lampenspektren aufgenommen. Aus diesen werden 500 aufeinander folgende Spektren gemittelt, um ein allgemeines, mittleres Lampenspektrum  $I'_{Lamp}(\lambda)$  zu erhalten. Um das best mögliche Lampenspektrum zu bekommen werden Spektren verwendet, die kurz vor der ersten Eingabe der Tracer aufgenommen wurden. So ist die Wahrscheinlich geringer, dass Spuren der Tracer in der Luft das Lampenspektrum verfälschen.

Am Ende jeder Messung wird das Dunkelspektrum aufgenommen. Auch hier werden wieder mindestens 3000 Spektren aufgezeichnet, aus denen über mindestens 500 Spektren gemittelt wird, um ein gemittelttes Dunkelspektrum  $I_{Dark}(\lambda)$  zu erhalten. Das Dunkelspektrum setzt sich zum einen aus thermischen Rauschen zusammen, zum anderen aus einem elektrischen Offset. Dieser Offset wird auf die gemessenen Signale addiert, um sicher zu stellen, dass diese positiv sind. Das Dunkelspektrum wurde am Ende jedes Messtages neu aufgenommen, da es von der Temperatur abhängt und sich somit über einen längeren Zeitraum verändern kann.

Dieses Dunkelspektrum wird dann vom Lampenspektrum abgezogen

$$I_{Lamp}(\lambda) = I'_{Lamp}(\lambda) - I_{Dark}(\lambda). \quad (4.1)$$

Die aufgenommenen Spektren werden ebenfalls auf das Dunkelspektrum korrigiert

$$I_{i,meas}(\lambda, t) = I'_{i,meas}(\lambda, t) - I_{Dark}(\lambda). \quad (4.2)$$

Aus diesen beiden Differenzen werden die Absorptionsspektren berechnet

$$A_{meas}(\lambda, t) = \ln\left(\frac{I_{Lamp}}{I_{i,meas}}\right) \quad (4.3)$$

Diese werden weiter mit Python verarbeitet.

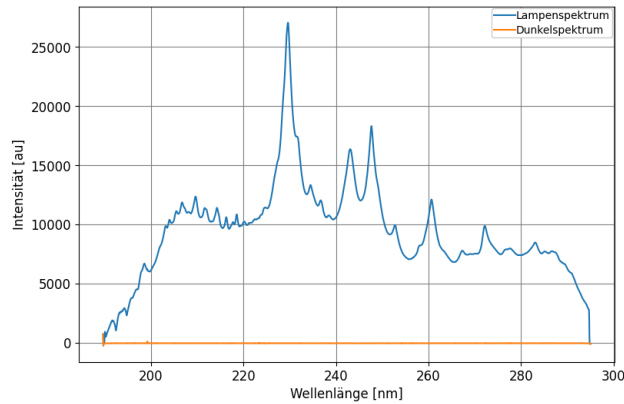


Abbildung 4.1: Beispielaufnahme von Lampen- und Dunkelspektrum

### 4.3 Datenverarbeitung

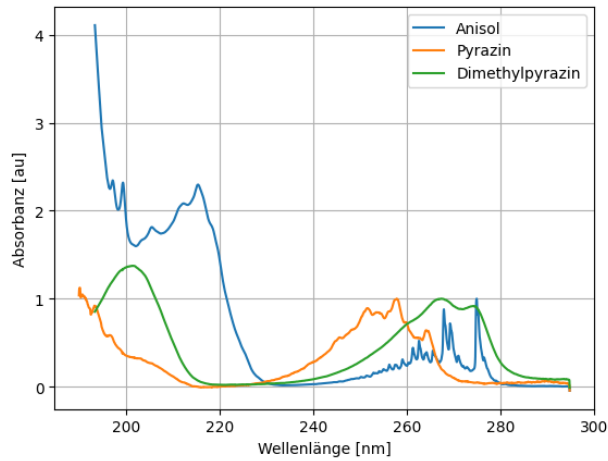
Die Verarbeitung der aufgenommenen Daten erfolgt in mehreren Schritten: Zunächst wurden Referenzspektren der einzelnen Tracer individuell aufgenommen, welche dann an die Absorptionsspektren, die während der eigentlichen Gasaustauschmessungen gemessen wurden, angefitet wurden. Der Fitbereich konnte nach belieben und Notwendigkeit angepasst werden.

#### 4.3.1 Referenzspektren

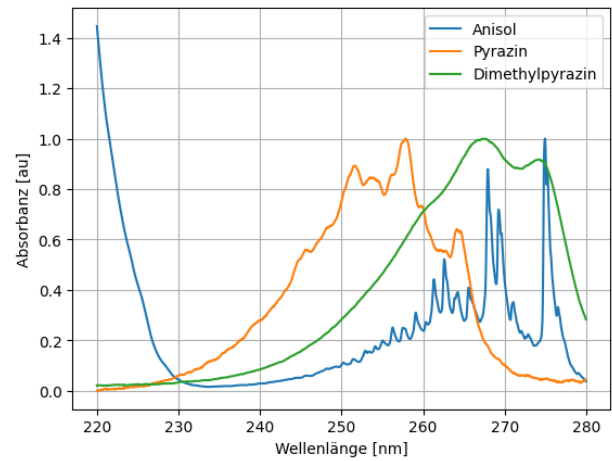
Die Aufnahme der Referenzspektren erfolgte ohne Wasser im Kanal. Die Eingabe  $j_V$  der Tracer in den Kanal wurde so eingestellt, dass das Maximum der Absorption im Wellenlängenbereich zwischen 240 und 280 nm möglichst eins betrug. Die Daten wurden gemäß den Gleichungen 4.1 bis 4.3 vorverarbeitet. Aus den aufgenommenen Spektren wurde über 500 Spektren gemittelt, die dieser Anforderung bestmöglich entsprechen. Das mittlere Referenzspektrum  $A'_{ref}(\lambda)$  wurde nun so skaliert, dass das Maximum des Spektrums auf eins liegt. Bei der Bestimmung des Maximums  $A_{max}$  wurde der Fitbereich auf 240 nm bis 280 nm beschränkt. Das ganze Spektrum wurde nun auf das Maximum normiert

$$A_{ref}(\lambda) = \frac{A'_{ref}(\lambda)}{A_{max}}. \quad (4.4)$$

Die verwendeten Referenzspektren von Anisol, Pyrazin und 2,5-Dimethylpyrazin sind in Abbildung 4.2 zu sehen.



(a) Referenzspektren über den ganzen Wellenlängenbereich



(b) Referenzspektren von 220 nm - 280 nm

Abbildung 4.2: Luftseitige Referenzspektren von Anisol, Pyrazin und Dimethylpyrazin

#### 4.3.2 Fit

Neben den Referenzspektren wird ein Polynom zweiten grades an die Daten gefitted

$$a_0(t_i) * \text{Off} + a_1(t_i) * \text{Lin}(\lambda) + a_2(t_i) * \text{Par}(\lambda) \quad (4.5)$$

wobei Off einen Offset, Lin eine Gerade und Par eine Parabel beschreibt. Diese dienen dazu, breitbandige Änderungen im Lampenspektrum während der Experimente auszugleichen. An jedes Spektrum  $A(\lambda, t_i)$  zur Zeit  $t_i$  wird nun folgende Formel gefitted:

$$A(\lambda, t_i) = a_0(t_i) * \text{Off} + a_1(t_i) * \text{Lin}(\lambda) + a_2(t_i) * \text{Par}(\lambda) + f_1(t_i) * A_{\text{ref,A}}(\lambda) + f_2(t_i) * A_{\text{ref,P}}(\lambda) + f_3(t_i) * A_{\text{ref,D}}(\lambda) \quad (4.6)$$

$A_{\text{ref,A}}$ ,  $A_{\text{ref,P}}$  und  $A_{\text{ref,D}}$  beschreiben hier jeweils die Referenzspektren von Anisol, Pyrazin und 2,5-Dimethylpyrazin.  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$  sind freie Parameter, die während des Fitprozesses angepasst werden.  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$  geben dabei die Absorption der Tracer relativ zu deren Referenzspektren an. Die verschiedenen Teile der Fitfunktion sind beispielhaft in Abbildung 4.3 zu sehen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden keine Konzantrationen berechnet. Im Folgenden werden die Begriffe Absorbanz und Konzentration synonym verwendet.

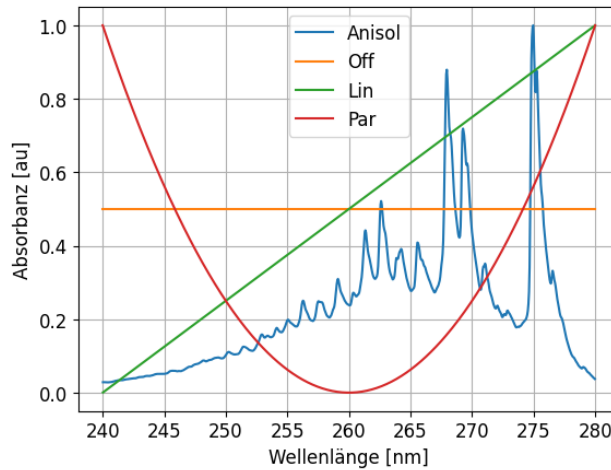


Abbildung 4.3: Beispiel der Fitfunktion, Off, Par und Lin sind künstlich generierte Funktionen, die mit den Referenzspektren angefitet werden, um breitbandige Änderungen im Lampenspektrum während der Experimente auszugleichen, hier ist beispielhaft das Referenzspektrum von Anisol gezeigt

## 4.4 Invasionsmessung

### 4.4.1 Boxmodell

Für die Experimente werden Bedingungen angenommen, die die Verwendung des Boxmodells erlauben. Dieses Modell wird im Folgenden erläutert.

Das Modell beruht auf den Massenbilanzgleichungen. Da hier Konzentrationen gemessen werden, da diese einfacher zu messen sind, können die Massen durch  $m = V \cdot c$  ersetzt werden.

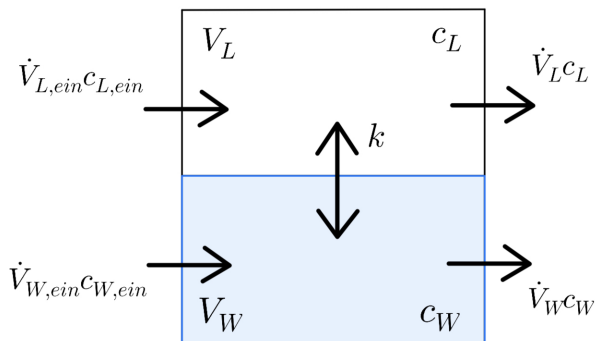


Abbildung 4.4: Boxmodell, Wasser - und Luftvolumen  $V_{W/L}$  mit den Tracerkonzentrationen  $c_{W/L}$ , Gasaustausch findet über die Wasseroberfläche  $A$  mit der Transferringeschwindigkeit  $k$  statt, über das Leck ist weiterer Austausch möglich

In Abbildung 4.4 ist ein Querschnitt durch den Kanal zu sehen. Der Luft- und Wasserraum werden als

getrennte Boxen mit den jeweiligen Volumina  $V_L$  und  $V_W$  und den Tracerkonzentrationen  $c_L$  und  $c_W$  betrachtet. Die Volumina können über die Messdauer als konstant angenommen werden.  $\dot{V}_{L,\text{ein}}$  beschreibt den Volumenstrom, mit dem die Tracer in den Kanal gegeben werden,  $\dot{V}_L$  den Volumenstrom, mit dem die Luft aus em Kanal entweicht. Der Gasaustausch findet über die Wasseroberfläche  $A$  mit der Gasaustauschgeschwindigkeit  $k$  statt. Unter der Annahme konstanter Temperatur und dass die verwendeten Tracer nicht in der Umgebungsluft vorkommen, ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$\dot{V}_L c_L = Ak \left( \frac{c_W}{\alpha} - c_L \right) - \dot{V}_L c_L + \dot{V}_{L,\text{ein}} c_{L,\text{ein}} \quad (4.7)$$

$$\dot{V}_W c_W = -Ak(c_W - \alpha c_L) \quad (4.8)$$

Hierbei beschreibt die erste Gleichung die Luftseite, die zweite Gleichung die Wasserseite. Da die Löslichkeit sehr groß ist kann angenommen werden, dass  $c_L \gg \frac{c_W}{\alpha}$ . Damit kann auch  $c_W(t) = 0$  angenommen werden. Dadurch entkoppeln die Differentialgleichungen und die luftseitige Gleichung vereinfacht sich zu

$$V_L \dot{c}_L = -(Ak + \dot{V}_L)c_L + \dot{V}_{L,\text{ein}} c_{L,\text{ein}} \quad (4.9)$$

$$\Rightarrow \dot{c}_L = - \left( \frac{A}{V_L} k + \frac{\dot{V}_L}{V_L} \right) c_L + \frac{\dot{V}_{L,\text{ein}} c_{L,\text{ein}}}{V_L}. \quad (4.10)$$

$\frac{A}{V_L} k = \lambda_L$  kann als Einstellrate des Gasaustauschs für einen luftseitigen Betrachter zusammengefasst werden.  $\frac{\dot{V}_L}{V_L} = \lambda_{\text{Leck}}$  beschreibt die Leckrate in der Einheit  $\frac{1}{h}$ .  $\frac{\dot{V}_{L,\text{ein}} c_{L,\text{ein}}}{V_L} = F_{\text{ein}}$  kann als Eingabeflussdichte aufgefasst werden, die auf das Luftvolumen normiert ist. Damit vereinfacht sich die vorige Gleichung zu

$$\dot{c}_L = -(\lambda_L + \lambda_{\text{Leck}})c_L + F_{\text{ein}}. \quad (4.11)$$

Diese ist mit einem Exponentialansatz lösbar, wodurch sich

$$c_L(t) = \frac{F_{\text{ein}}}{(\lambda_L + \lambda_{\text{Leck}})} + c_0 \exp(-(\lambda_L + \lambda_{\text{Leck}})t) \quad (4.12)$$

als Lösung ergibt.

Aus dem initialen Anstieg der Konzentration lässt sich ebenfalls die Transfargeschwindigkeit bestimmen. Unter der Unter der Annahme, dass die Eingabe von Beginn an konstant erfolgt und in der Kanalluft keine



Tracer vorhanden sind, wird Gleichung 4.9 nach Umstellen zu

$$\dot{V}_{L,\text{ein}} c_{L,\text{ein}} = V_{L,\text{ein}} \dot{c}_{L,\text{ein}} = A c_L k_L \quad (4.13)$$

$$\Rightarrow k_L = \frac{V_L \dot{c}_L}{A c_L}. \quad (4.14)$$

Die Leckrate kann hierbei vernachlässigt werden, da nur der Beginn der Eingabe betrachtet wird und somit kein Tracer entweichen kann, zumal der betreffende Zeitraum sehr gering ist. Eine weitere Möglichkeit die Transfargeschwindigkeit zu erhalten, ist aus dem Konzentrationsabfall.

$$\lambda = \frac{\dot{c}_L}{c_L} = \frac{A}{V_L} k_L \quad (4.15)$$

$$\Rightarrow k_L = \frac{\lambda V_L}{A} \quad (4.16)$$

$$\Rightarrow c(t) = c_0 \exp(-\lambda t). \quad (4.17)$$

Aus Gleichung 4.9 folgt für  $\dot{V}_{L,\text{ein}} c_{L,\text{ein}} = 0$ , also keine weitere Eingabe stattfindet, folgt Gleichung 4.16. Durch lösen der Differentialgleichung folgt Gleichung 4.17.

#### 4.4.2 Durchführung ohne Oberflächenfilme

Um ein homogenes Wellenfeld mit deutlichen Kapillarwellen zu erhalten, müssen vor Beginn jeder Messung Oberflächenfilme von der Wasseroberfläche entfernt werden. Hierzu wird eine Barriere in den Kanal angebracht, die senkrecht zur Windrichtung zwischen die Wände des Kanals geklemmt wird. An dieser Barriere befindet sich eine Rinne, in deren Mitte ein Loch ist, an dem ein Schlauch befestigt ist. Über diesen Schlauch wird mit Hilfe einer Pumpe das Wasser aus der Rinne abgesaugt. Die Barriere wird so im Kanal angebracht, dass das Wasser an der Wasseroberfläche bei einem Wind von 5 -7 Hz knapp über die Rinne läuft. Dieser Prozess wird als Skimmen bezeichnet. Der Wasserstand im Aeolotron nach dem Skimmen beträgt im Durchschnitt  $(101,5 \pm 2)$  cm.

Die Aufnahmen werden analog wie in Kapitel 4.2 beschrieben durchgeführt. Während der Messungen wurden verschiedene Windgeschwindigkeiten von niedrig bis hoch aufgenommen (siehe Tabelle 2 im Anhang). Die Zunahme der Konzentration im Luftraum ist nicht linear, da zum einen ein Teil der Tracer durch das luftseitige Leck aus dem Kanal entweicht, zum anderen findet während der Eingabe bereits Gasaustausch

über die Wasseroberfläche statt. Die Eingabe erfolgt solange, bis sich ein konstanter Absorptionswert für die Tracer eingestellt hat. Dann wird die Eingabe beendet und es wird bei gleichem Wind eine Zeit lang abgewartet. Anschließend wird der Luftraum gespült und die nächste Windgeschwindigkeit eingestellt (die Zeiten hierfür sind ebenfalls in Tabellen im Anhang gegeben). Die Auswertung der erhaltenen Daten erfolgt wie in Kapitel 4.3 beschrieben.

#### 4.4.3 Durchführung mit Oberflächenfilmen

Die Messungen verlaufen größtenteils wie die Messungen ohne Oberflächenfilm.

Nach dem Skimmen wird der Oberflächenfilm mit einer Spritze auf die Wasseroberfläche aufgetropft. Im Fall von Hexadecanol werden 8 ml aufgetragen, bei Olivenöl, welches in Ethanol gelöst ist, werden 9 ml aufgetragen. Beide sind in Ethanol gelöst. Im Fall von Hexadecanol 1,02 g auf 200 ml Ethanol, sprich  $5,1 \frac{g}{l}$ , für Olivenöl 1,00 g auf 200 ml, sprich  $5 \frac{g}{l}$ . Beim Auftragen muss darauf geachtet werden, dass der Abstand zwischen Spritze und Wasseroberfläche möglichst gering ist, damit die Tropfen nicht zu tief eindringen und der Film sich auf der Oberfläche bilden kann. Bei der Messung mit Olivenöl werden zusätzlich zwei mal 2 ml Film zusätzlich während der Messung auf die Oberfläche gegeben, da der Film sehr schnell aufreißt und Wellen entstehen. Nach dem Auftragen der Filme wird nicht mehr geskimmt. Für den dritten Film wird Tergitol verwendet. Da dieser wasserlöslich ist, wurden 100 ml des Tergitol zu 5 l wässriger Lösung angemischt und direkt in das Wasser gegeben. Es muss hier beim Skimmen darauf geachtet werden, den beim Hochpumpen des Wassers in den Kanal entstandenen Schaum zu entfernen. Die Messzeiten sind hier identisch zu den Messungen ohne Oberflächenfilm. Bei den Messungen mit dem Meereis-Modell werden die Schollen direkt in den Kanal gegeben. Es wird dabei versucht darauf zu achten, dass möglichst viele der Schollen möglichst einzeln auf dem Wasser schwimmen und sich nicht direkt zu Beginn stapeln oder zusammenhängen. Es werden 3 Messungen mit dem Meereis-Modell durchgeführt: Eine Messung mit 100 Schollen, eine mit 700 Schollen und eine mit 1705 Schollen.

## 5 Auswertung

Da die Auswertung der Daten mit und ohne Oberflächenfilm auf die selbe Weise vorgenommen wird, wird diese nur etwas ausführlicher bei den Daten ohne Oberflächenfilm erläutert. Bei der Auswertung mit Oberflächenfilmen wird nur auf Besonderheiten eingegangen. Der Hauptteil der Auswertung findet im Vergleich zwischen den Ergebnissen mit und ohne Oberflächenfilme statt.

### 5.1 Auswertung ohne Oberflächenfilm

Zunächst werden die Messergebnisse ohne Oberflächenfilm ausgewertet. Die Auswertung findet nach den einzelnen Tracern sortiert statt.

Hierzu wird wie in Abschnitt 4.3.2 erläutert die Referenzspektren der Tracer sowie das Polynom 2. Grades gefittet. An die sich daraus ergebenden Absorbanceverläufe werden nun für die einzelnen Tracer Gleichung 4.12 an den Anstieg und Gleichung 4.15 an den Abfall gefittet.  $\lambda_A$ ,  $F_{\text{ein}}$  und  $c_0$  sind dabei für den Anstieg freie Parameter, für den Abfall sind  $c_0$  und  $\lambda$  freie Parameter. Die Leckrate  $\lambda_{\text{Leck}}$  stammt aus einer Messung mit  $CF_4$ . Das Gas wurde vor Beginn jeder Tracereingabe in den Luftraum des Kanals gegeben, die Konzentration wurde über die Messzeit gemessen und geplottet. Aus einem linearen Fit an den Abfall der Konzentration (von Start der Tracereingabe bis Lüftung) konnte die Leckrate in  $\frac{l}{h}$  bestimmt werden. Aus den Fits an die Konzentrationsverläufe kann dann wie in Kapitel 4.4.1 erläutert die Transfargeschwindigkeit abgelesen bzw. aus den Fitparametern berechnet werden. Für die Unsicherheit gilt

$$\Delta k_{\text{Anstieg}} = \sqrt{\left(\frac{V_L}{A} \Delta \lambda_A\right)^2 + \left(\frac{\lambda_A}{A} \Delta V_L\right)^2 + \left(-\frac{\lambda_A \cdot V_L}{A^2} \Delta A\right)^2} \quad (5.1)$$

$$\Delta k_{\text{Abfall}} = \sqrt{\left(\frac{V_L}{A} \Delta \lambda\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{A} \Delta V_L\right)^2 + \left(-\frac{\lambda \cdot V_L}{A^2} \Delta A\right)^2}. \quad (5.2)$$

$\Delta \lambda_A$  und  $\Delta \lambda$  sind dabei die Unsicherheiten der Parameter, die aus automatisch aus dem Fit gewonnen werden können.

#### 5.1.1 Anisol

Bei Anisol liegt die Besonderheit vor, dass die Absorbance nie ein klares Plateau erreicht, sondern aufgrund seiner geringen Löslichkeit immer weiter ansteigt. In Abbildung 5.1 (a) ist beispielhaft der zeitliche Absorbanceverlauf für Messtag A dargestellt. Auf der x-Achse ist die Tageszeit, auf der y-Achse die Absorbance

zusehen. Die vertikalen eingezeichneten Linien in Abbildung 5.1 (b) trennen dabei die verschiedenen Phasen in der Messung ab. In Abbildung 5.3 sieht man die Fitfunktionen an den An- und Abstiegen der Messung. Die daraus errechneten Transfargeschwindigkeiten sind in Tabelle 5 aufgelistet. Die Eingaberate des mit Anisoldampf gesättigter Luft beträgt hier durchgehend  $5 \frac{l}{min}$ .

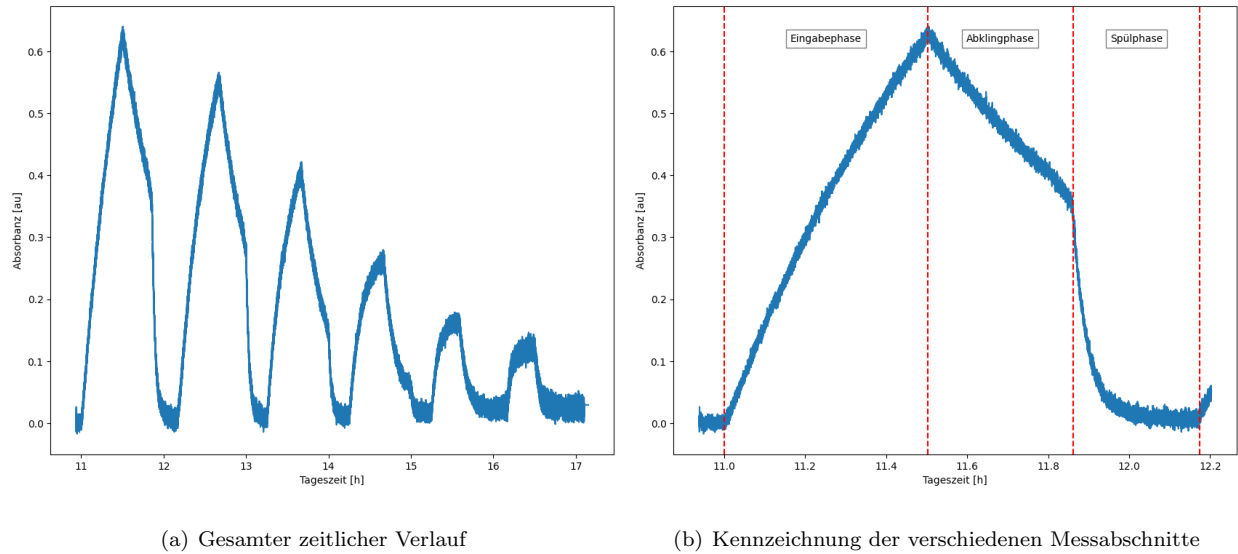


Abbildung 5.1: Zeitlicher Verlauf der Absorbanz von Anisol

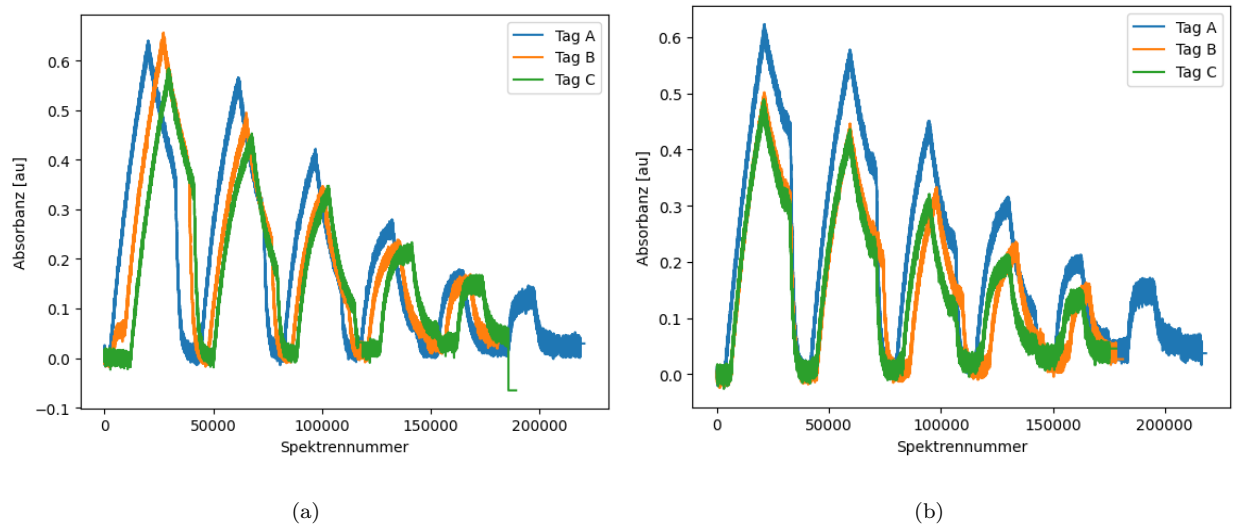
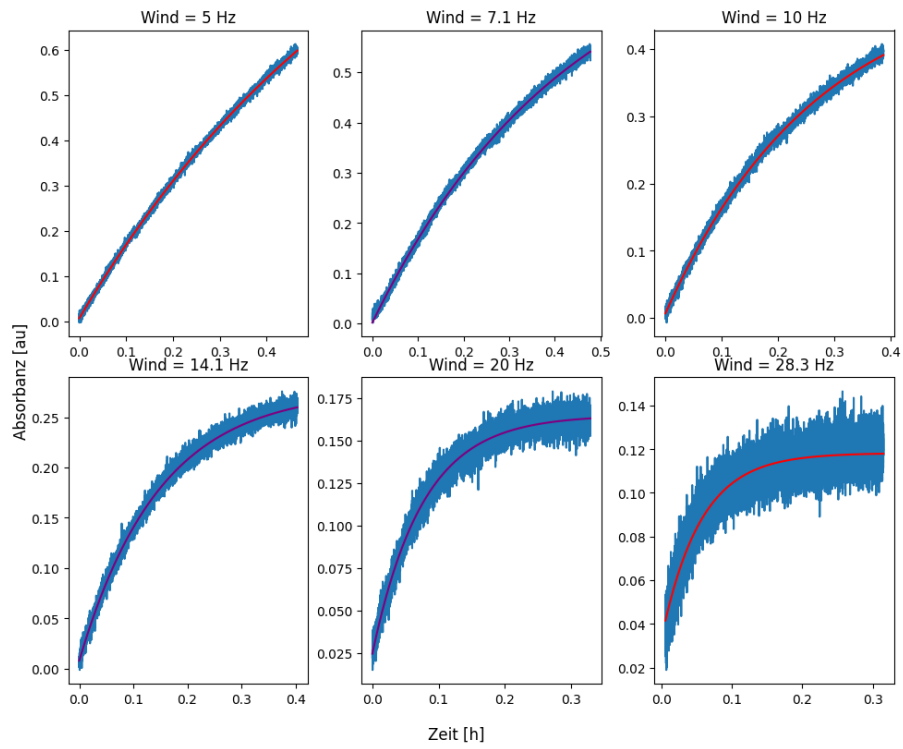
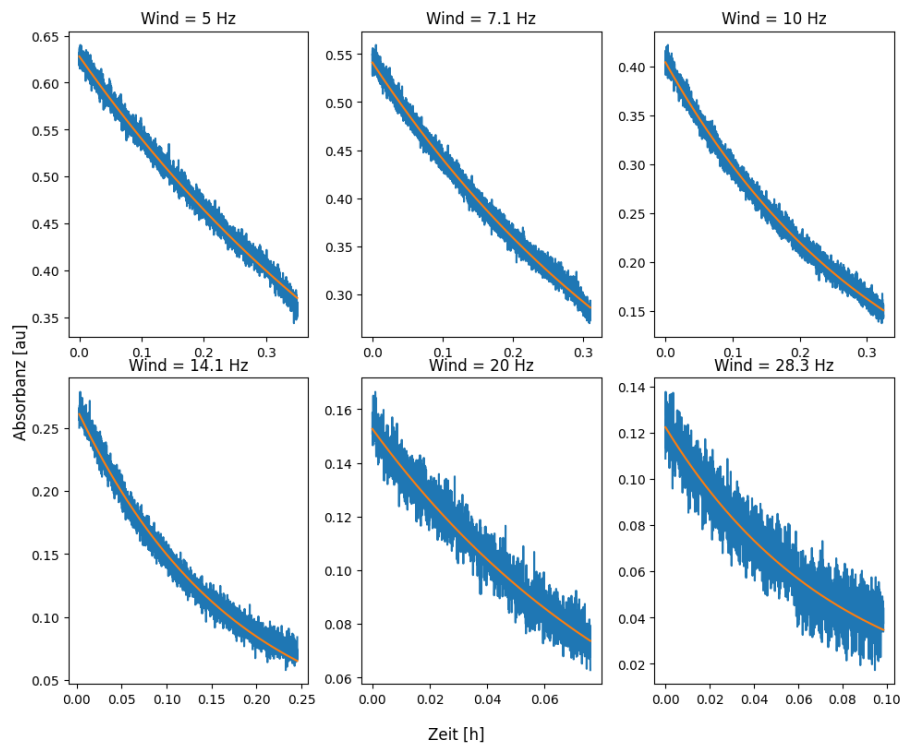


Abbildung 5.2: Zeitlicher Verlauf der Absorbanz von Anisol für Messtage ohne Filme



(a) Fit an den Anstieg



(b) Fit an den Abfall

Abbildung 5.3: Fits an die Konzentrationsgefälle von Anisol

Abbildung 5.1 (a) zeigt den gesamten zeitlichen Absorbanzverlauf eines Messtages. Die Abbildungen in 5.2 zeigen eben diese Verläufe für Anisol für alle Messtage ohne Oberflächenfilm. In Abbildung 5.1 (b) sind die verschiedenen Phasen während eines Messzyklus beispielhaft eingezeichnet, um ein besseres Verständnis für den Ablauf der Messungen zu geben.

Ein Beispiel für die Fits, die an diesen Verläufen vorgenommen wurden, ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Die Transfergeschwindigkeiten werden nun gegen die Windgeschwindigkeit in einem doppellogarithmischen Plot aufgetragen (siehe Abbildung 5.4). Alle Plots der Messergebnisse sind doppellogarithmisch.

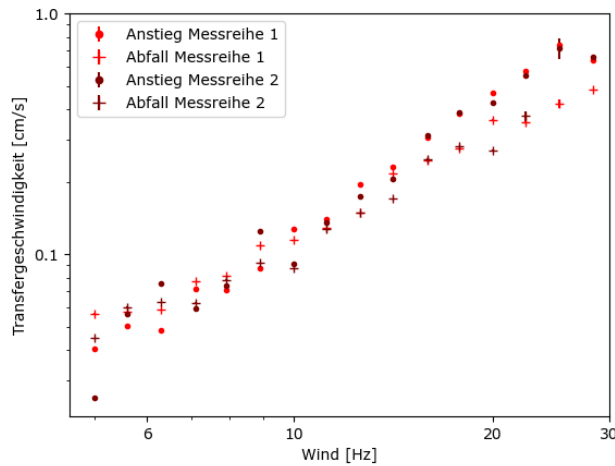


Abbildung 5.4: Transfergeschwindigkeiten für alle Messtage für Anisol

Wie man an den graphischen Darstellungen der Werte erkennen kann, steigt die Transfergeschwindigkeit mit wachsendem Wind. Die Unsicherheiten sind in den Graphiken eingezeichnet, in den meisten Fällen jedoch sind sie deutlich kleiner als das eigentliche Symbol. Es lässt sich zwischen den Werten aus dem Anstieg und Abfall ein Unterschied erkennen. Die Eingabe in den Kanal erfolgte von Beginn an mit der gewünschten Eingaberate, wobei die Massenflussregler ein wenig während der Messungen schwankten. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass sich durch die Verdunstungskälte der Dampfdruck in den Waschflaschen verändert, was zu einer variablen Eingaberate führt. Zwar wurde versucht dem entgegenzuwirken, indem die Flaschen in ein Wasserbad gestellt wurden, jedoch kompensiert es den Effekt nicht ganz. Bei den Konzentrationsabfällen gibt es einige Fälle, in denen die Konzentration nicht wieder ganz auf Null abgesunken ist. Grund hierfür ist, dass ein Teil der Tracer in das Wasser übergeht, aber ab einem gewissen Punkt auch aus dem Wasser in die Luft zurück transferiert. Darum sind die Werte aus beiden Methoden für Anisol mit Unsicherheiten behaftet, aber liefern beide ähnliche Ergebnisse und sind somit beide gut geeignet.

Da Anisol ein wasserseitig kontrollierter Tracer ist, im Vergleich zu Pyrazin und 2,5-Dimethylpyrazin,

welche luftseitig kontrolliert sind, ist dieser Stoff am interessantesten. Teilt man die Werte der Transfergeschwindigkeit durch die Löslichkeit des Tracers, erhält man die Werte der Transfergeschwindigkeit der Wasserseite (Abbildung 5.5 (a)). Nimmt man den Kehrwert der Transfergeschwindigkeit, so erhält man nach Gleichung 2.23 den Transferwiderstand (Abbildung 5.5 (b)). Für die Berechnung dieser Werte wurden die Mittelwerte der Transfergeschwindigkeiten verwendet.

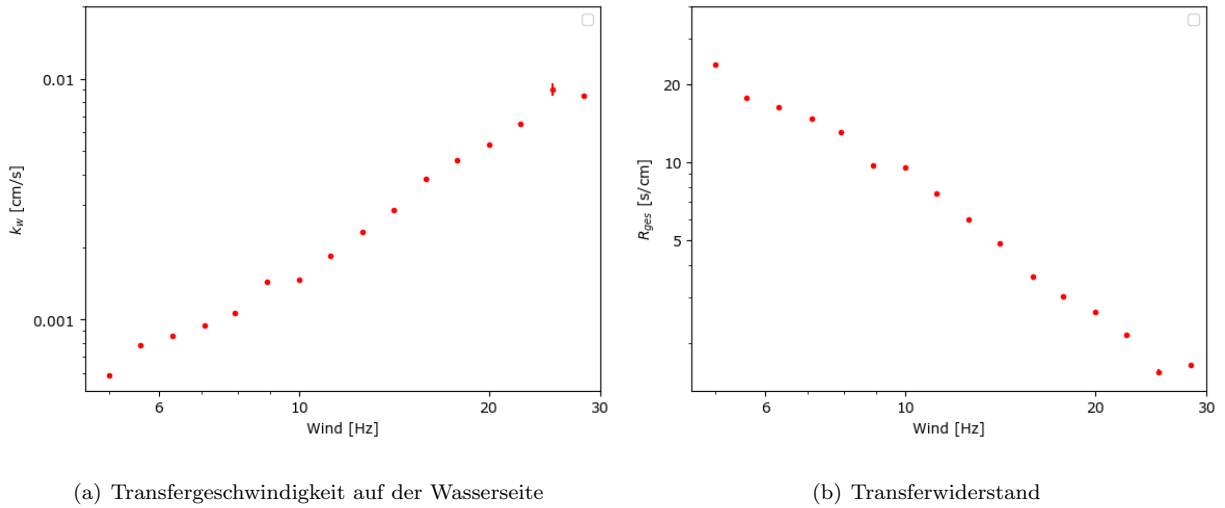


Abbildung 5.5: Darstellung wichtiger Größen für Anisol

Wie in Abschnitt 2.2.3 angesprochen kann nun für Anisol der Wasseranteil  $R_W$  des Transferwiderstandes  $R_{ges}$  berechnet werden. Dazu wird aus den Pyrazinen der Luftanteil  $R_L$  nach Gleichung 2.23 berechnet. Aus den Transfergeschwindigkeiten von Anisol erhält man analog den Gesamttransferwiderstand. Durch umstellen von Gleichung 2.25 nach  $R_W$  kann eben dieses berechnet werden.

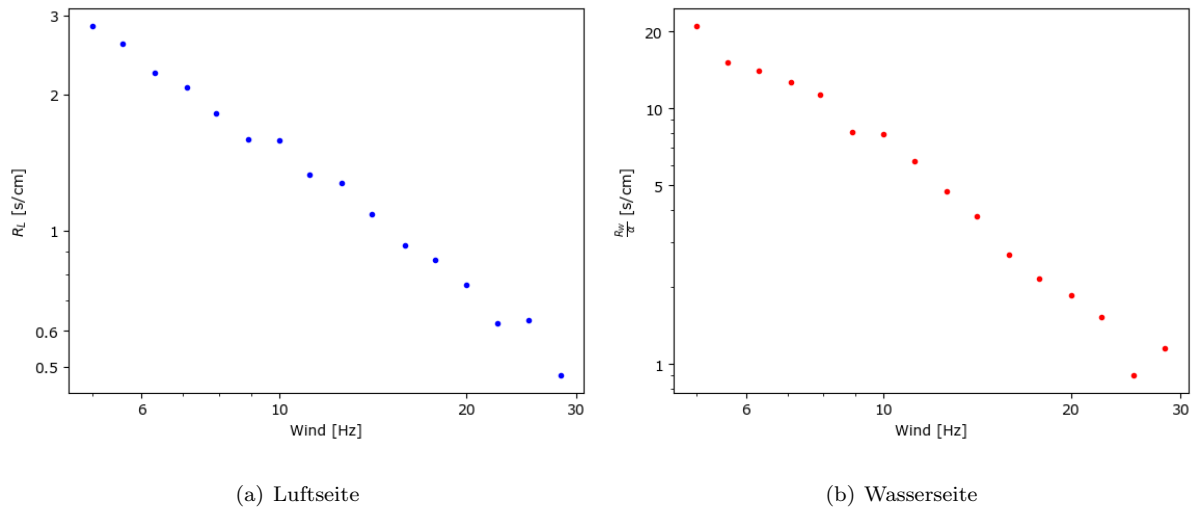


Abbildung 5.6: Luft- und Wasseranteil des Transferwiderstandes für Anisol

Wie man anhand der Grafiken in Abbildung 5.6 erkennen kann, macht der Anteil des Wassers für Anisol einen Großteil des Transferwiderstandes aus. Dies deckt sich damit, dass Anisol wasserseitig kontrolliert ist.

### 5.1.2 2,5-Dimethylpyrazin

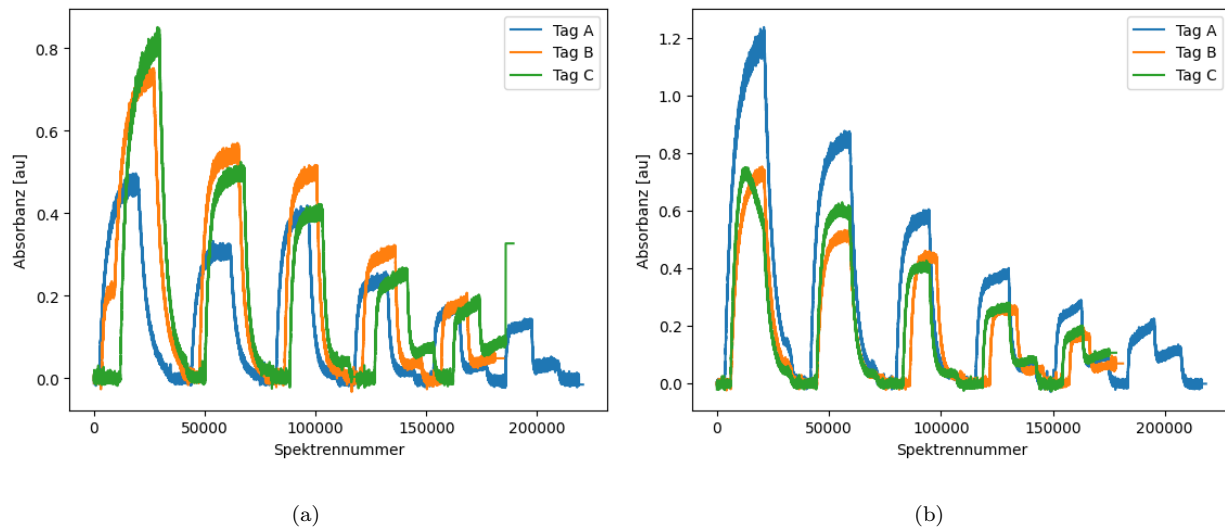


Abbildung 5.7: Zeitlicher Verlauf der Absorbanz von 2,5-Dimethylpyrazin für Messtage ohne Filme

Betrachtet man Abbildung 5.7 (a) sieht man man Absorptionsverlauf von Tag B gleich zu Beginn eine Unregelmäßigkeit im Verlauf, welche ebenfalls bei den anderen Tracern zu finden ist. An diesem Tag wurde



vor Messbeginn vergessen, die Lüftung auszuschalten, sodass die Eingabe der Tracer bereits begonnen hatte, bevor das Lüften beendet war.

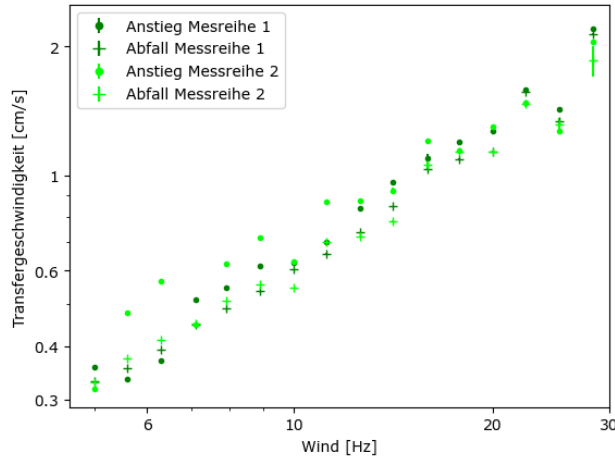


Abbildung 5.8: Transfargeschwindigkeiten für alle Messtage für 2,5-Dimethylpyrazin

Auch hier ist der Unterschied zwischen den Werten der beiden Messreihen und aus Anstieg und Abfall gering (vergleiche Abbildung 5.8). An den Absorptionsverläufen (Abbildung 5.7) erkennt man, dass Dimethylpyrazin selten ein stabiles Plateau erreicht hat. Man sieht ebenfalls, dass die Abfälle im weitergehenden Verlauf immer weniger auf Null zurück abfallen. Darum sind die Werte aus dem Konzentrationsabfall besser geeignet.

### 5.1.3 Pyrazin

Pyrazin wurde nicht von Anfang an als Lösung in den Kanal gegeben. Zuerst wurde es als Feststoff direkt in ein Glasrohr gefüllt, durch welches die Druckluft geleitet wurde. Aufgrund der dabei hohen verbrauchten Mengen an Pyrazin wurde es danach als Gemisch mit Sand in einer Waschflasche gefüllt und das Glasrohr mit dem Feststoff dadurch ersetzt. Da dabei jedoch kein stabiles Plateau erreicht wurde, wurde es schließlich als Lösung angemischt, wie die anderen Tracer in einer Waschflasche über Sand gegeben und statt des Sand-Feststoff-Gemischs an den Kanal angeschlossen.

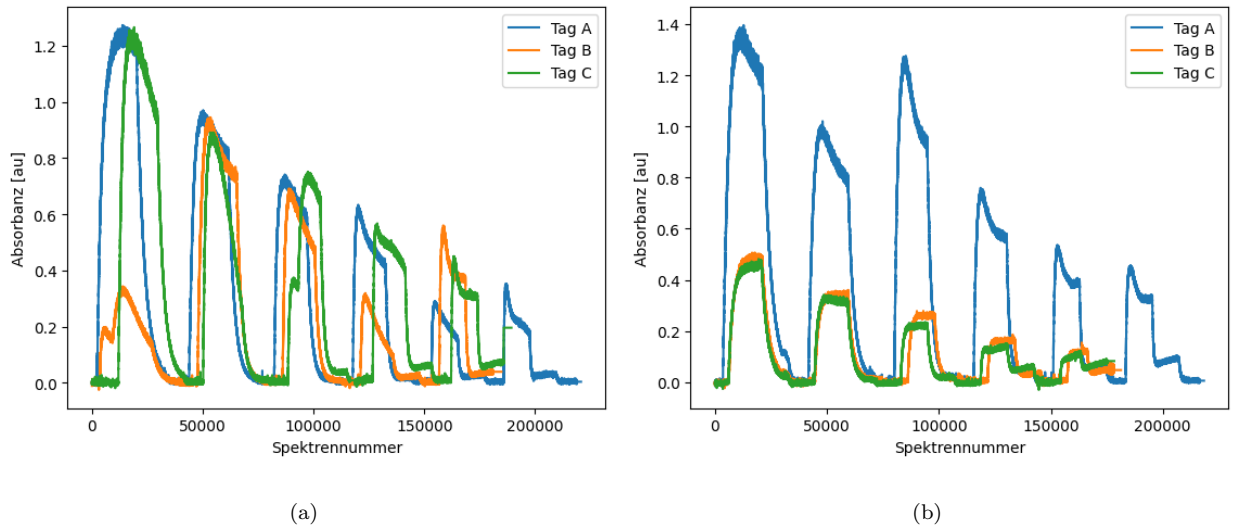


Abbildung 5.9: Zeitlicher Verlauf der Absorbanz von Pyrazin für Messtage ohne Filme

Im Absorptionsverlauf für Tag C in Abbildung 5.9 (a) sieht man eine Unregelmäßigkeit im Anstieg, die bei den anderen Tracern nicht auftritt. Grund hierfür ist, dass die Flasche mit dem Pyrazin-Sand-Gemisch nicht richtig geschlossen war und somit nicht die ganze Menge des verdampften Pyrazins von Anfang an in den Kanal gelangen konnte. Ebenfalls auffällig sind die Spitzen an den Stellen in den Absorptionsverläufen, an denen eigentlich stabile Plateaus sein sollten (siehe zum Beispiel Abbildung 5.9 (b) Tag A). Dies ist der Hauptgrund, weshalb beschlossen wurde, das Pyrazin als Lösung zu verwenden. Die Umstellung fand während der zweiten Messreihe von Tag A zu Tag B statt. Tag A wurde also noch mit dem Sand-Gemisch gemessen, Tag B bereits mit der Lösung.

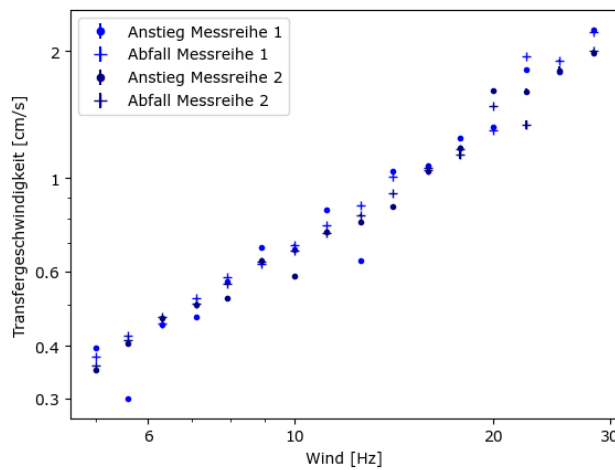


Abbildung 5.10: Transfervgeschwindigkeiten für alle Messtage für Pyrazin

Auch hier stimmen die berechneten Werte miteinander gut überein, wie in Abbildung 5.10 zu sehen ist. Da die Plateaus hier jedoch so gut wie garnicht vorhanden waren, sind die Werte aus den Konzentrationsabfällen besser geeignet.

## 5.2 Auswertung mit Oberflächenfilm

### 5.2.1 Anisol

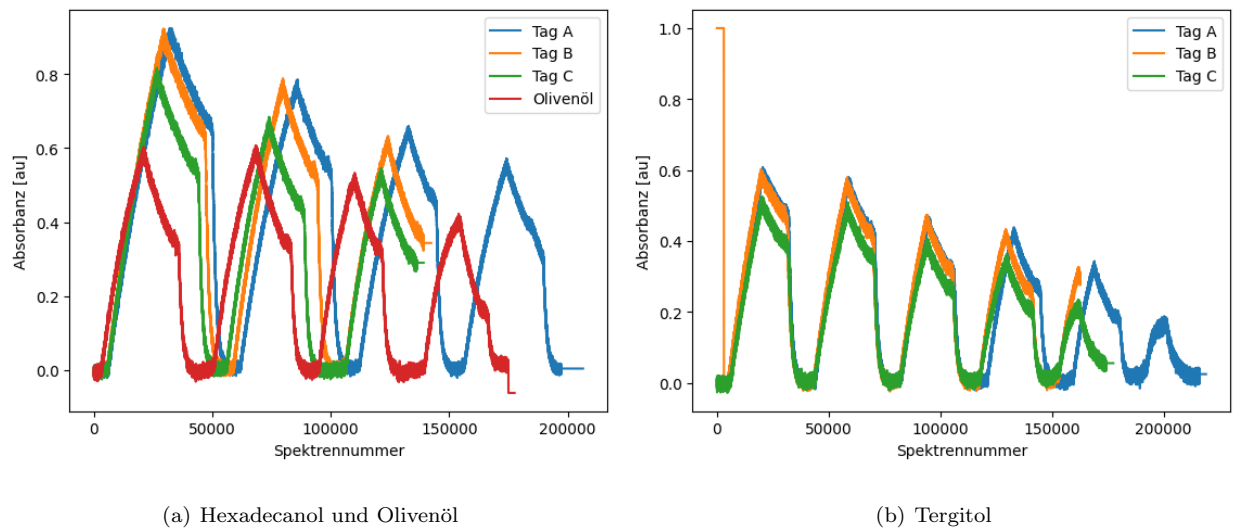
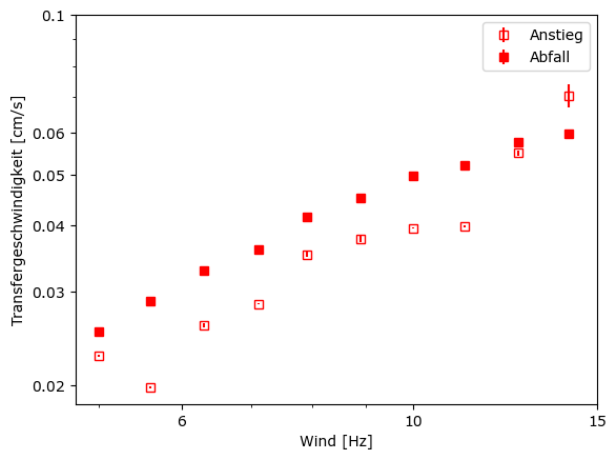
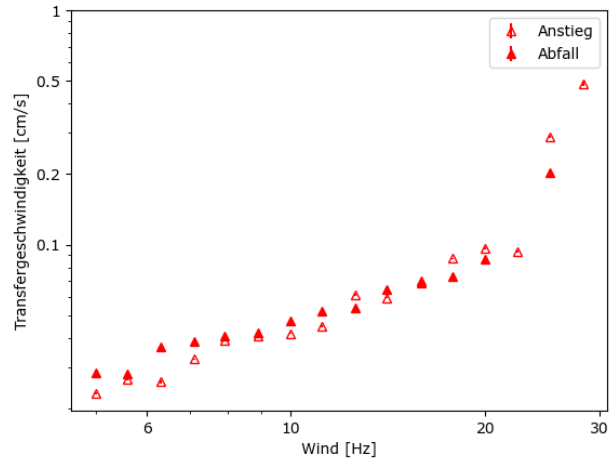


Abbildung 5.11: Zeitlicher Verlauf der Absorbanz von Anisol für Messtage mit Filmen

Betrachtet man Abbildung 5.11 (b) sieht man, dass der Verlauf für Messtag B sehr früh abgeschnitten ist. Grund hierfür ist, dass die Messung automatisch aufgrund zu geringen Speicherplatzes abgebrochen wurde. Deshalb konnte für keinen der Tracer ein Fit an den letzten Konzentrationsabfall für diesen Tag (Tag B für Tergitol) vorgenommen werden.

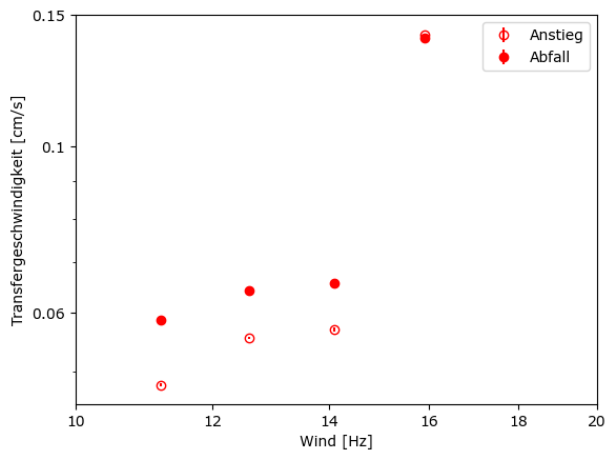


(a) Hexadecanol

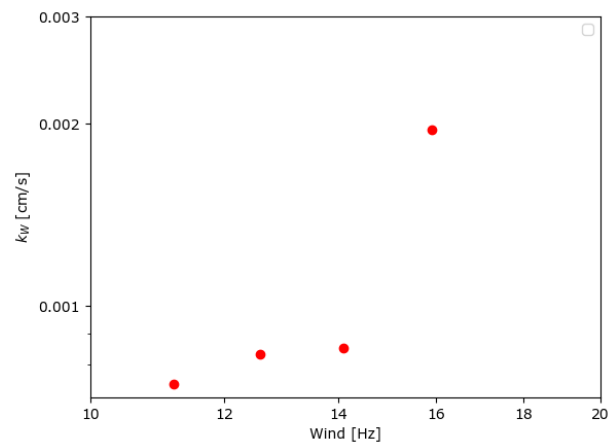


(b) Tergitol

Abbildung 5.12: Transfargeschwindigkeiten für Messtage mit Filmen für Anisol

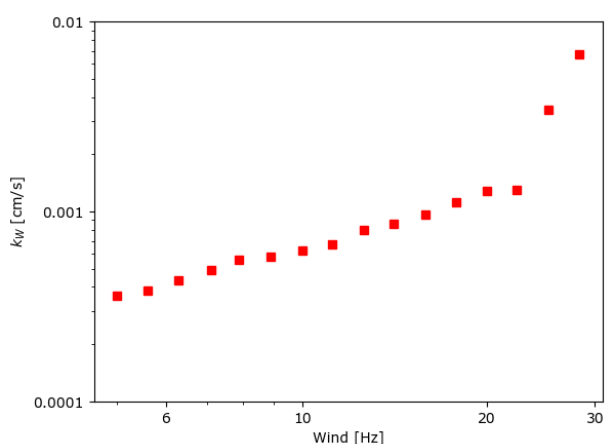


(a) Luftseite

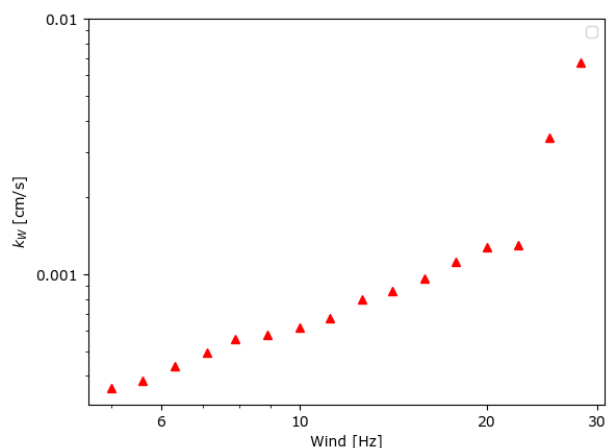


(b) Wasserseite

Abbildung 5.13: Transfargeschwindigkeit für Messtage mit Olivenölfilm für Anisol



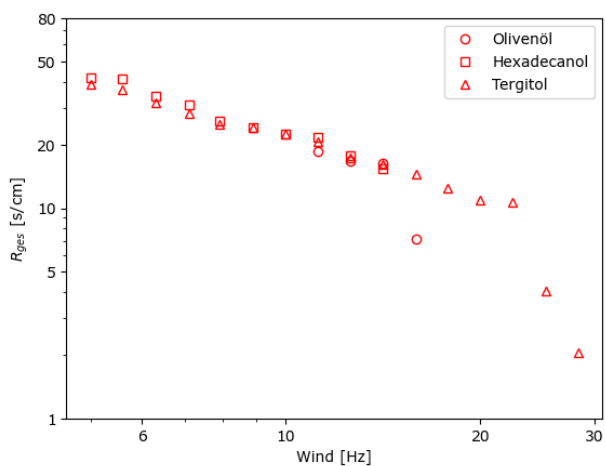
(a) Hexadecanol



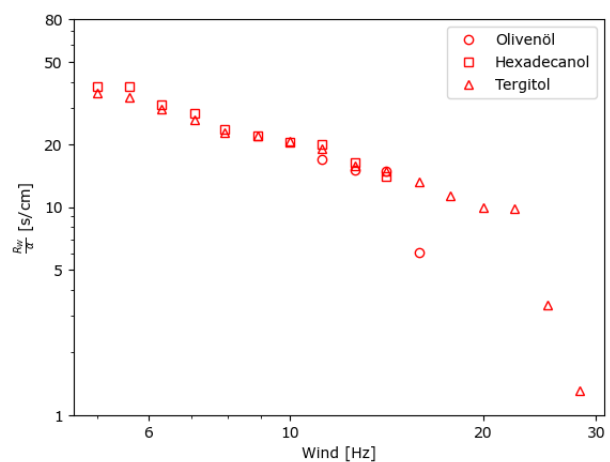
(b) Tergitol

Abbildung 5.14: Transfergeschwindigkeit im Wasser von Anisol mit Filmen

Die Knicke in den Verläufen bei Olivenöl ab einem Wind von 15,9 Hz und Tergitol ab einem Wind von 22,4 Hz kennzeichnen den Moment, an dem die jeweiligen Filme während der Messung gerissen sind und sich Wellen gebildet haben. Die Werte der Wasserseite verhalten sich analog (siehe Abbildungen 5.12 bis 5.14).



(a) Gesamtwiderstand

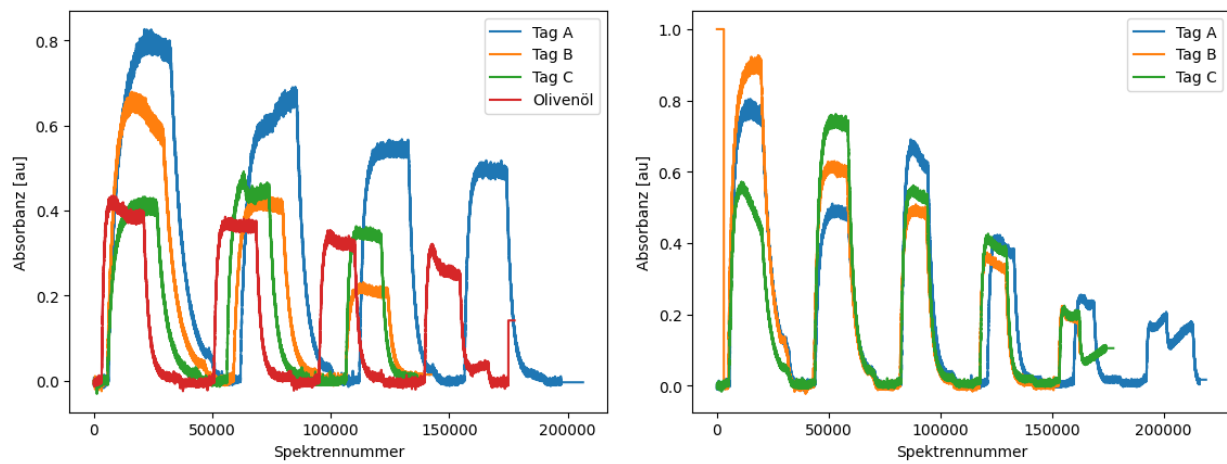


(b) Transferwiderstand Wasser

Abbildung 5.15: Transferwiderstände mit Filmen für Anisol

Wie bei den Werten ohne Oberflächenfilm sieht man in Abbildung 5.15, dass der größte Teil des Transferwiderstandes für Anisol wie erwartet im Wasser liegt. Welchen konkreten Einfluss die Filme auf den Transferwiderstand haben, wird im nächsten Kapitel betrachtet.

## 5.2.2 Pyrazin



(a) Hexadecanol und Olivenöl

(b) Tergitol

Abbildung 5.16: Zeitlicher Verlauf der Absorbanz von Pyrazin für Messtage mit Filmen

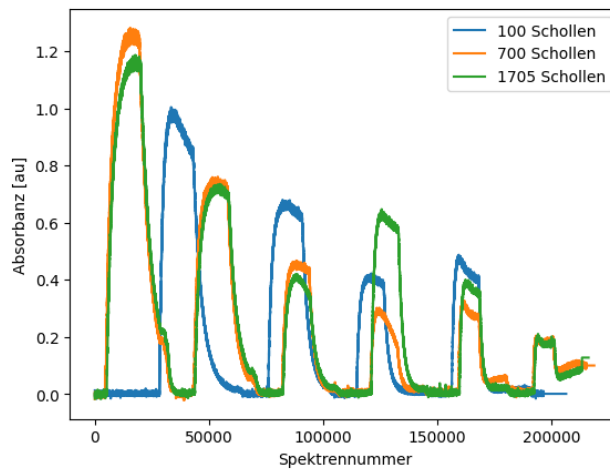
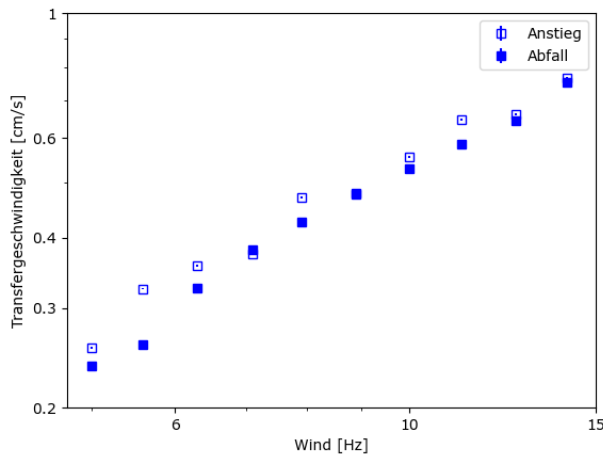
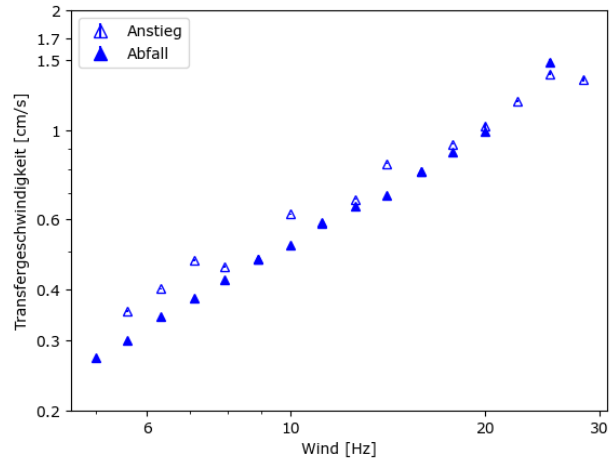


Abbildung 5.17: Zeitlicher Verlauf der Absorbanz von Pyrazin für Messtage mit Meereis-Modell

In Abbildung 5.16 (a) für Olivenöl ist am Ende des Verlaufs ein vertikaler Strich zu sehen, den es ebenfalls in (b) für Tag B zu Beginn des Absorptionsverlaufs gibt. Dies sind die jeweiligen Aufnahmen der Dunkelspektren. In Abbildung 5.17 für 700 und 1705 Schollen sieht man am Ende des ersten Messzyklus, dass die Konzentration noch nicht ganz auf Null abgefallen war, bevor mit dem Spülen begonnen wurde. Hier hätte also noch etwas länger abgewartet werden können.



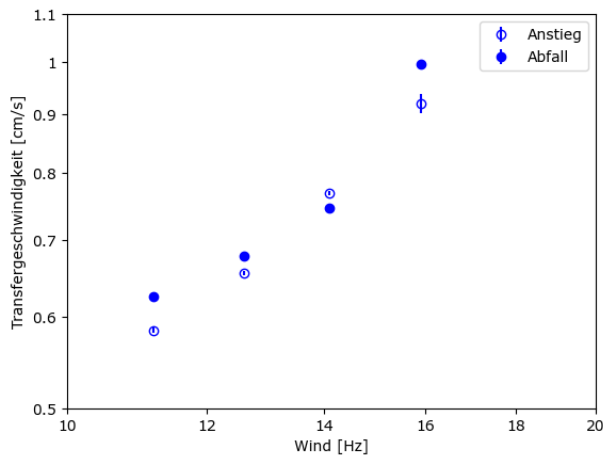
(a) Hexadecanol



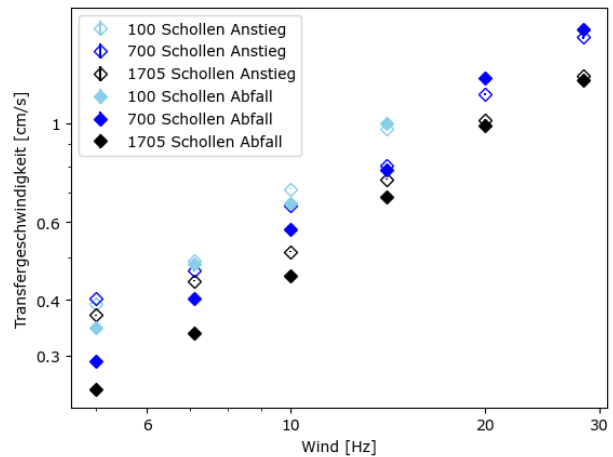
(b) Tergitol

Abbildung 5.18: Transferringeschwindigkeiten für Messtage mit Filmen für Pyrazin

An den Graphiken in Abbildung 5.18 lässt sich aber erkennen, dass die Werte aus den Anstiegen und Abfällen für Hexadecanol und Tergitol gut übereinstimmen. Was auffällt ist, dass im Vergleich zu Anisol kein Knick in den Werten der Transferringeschwindigkeiten bei Tergitol bei einem Wind von 22,4 Hz zu erkennen ist. Das Aufreißen des Films hat also keinen erkennbaren Einfluss auf den Transfer des Pyrazins.



(a) Olivenöl



(b) Meereis-Modell

Abbildung 5.19: Transferringeschwindigkeiten für Messtage mit Filmen für Pyrazin

Wie bereits zuvor bei Anisol sieht man auch hier bei Pyrazin bei den Transferringeschwindigkeiten für Olivenöl den Knick bei einem Wind von 15,9 Hz. Hier ist der Unterschied zu den vorigen Werten jedoch nicht

so groß wie bei Anisol, woran sich erkennen lässt, dass der Einfluss des Films auf Pyrazin deutlich geringer ist als auf Anisol (vergleiche Abbildung 5.19).

### 5.2.3 2,5-Dimethylpyrazin

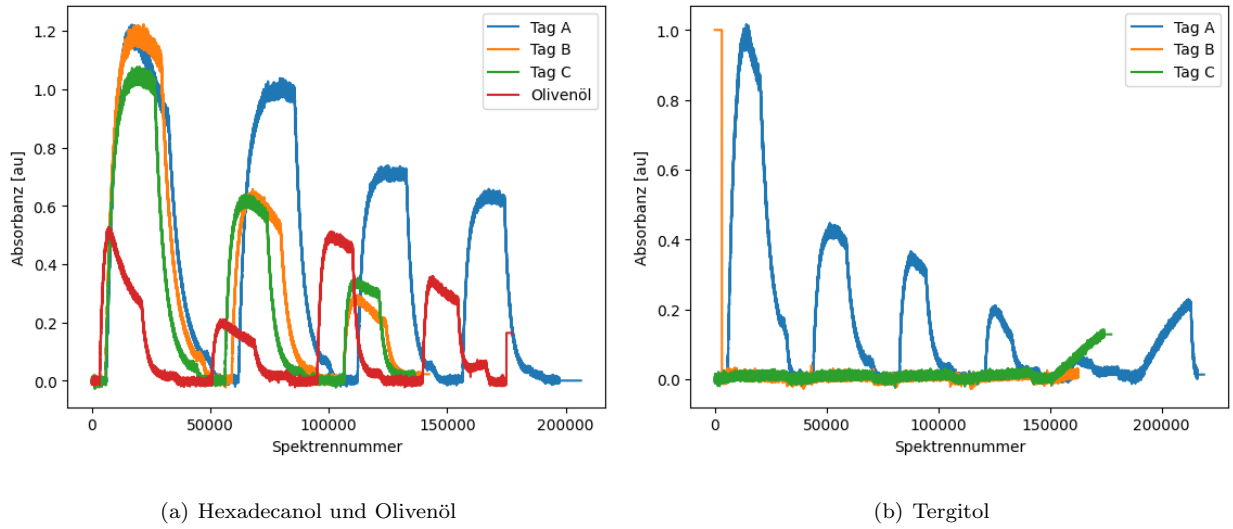


Abbildung 5.20: Zeitlicher Verlauf der Absorbanz von 2,5-Dimethylpyrazin für Messtage mit Filmen

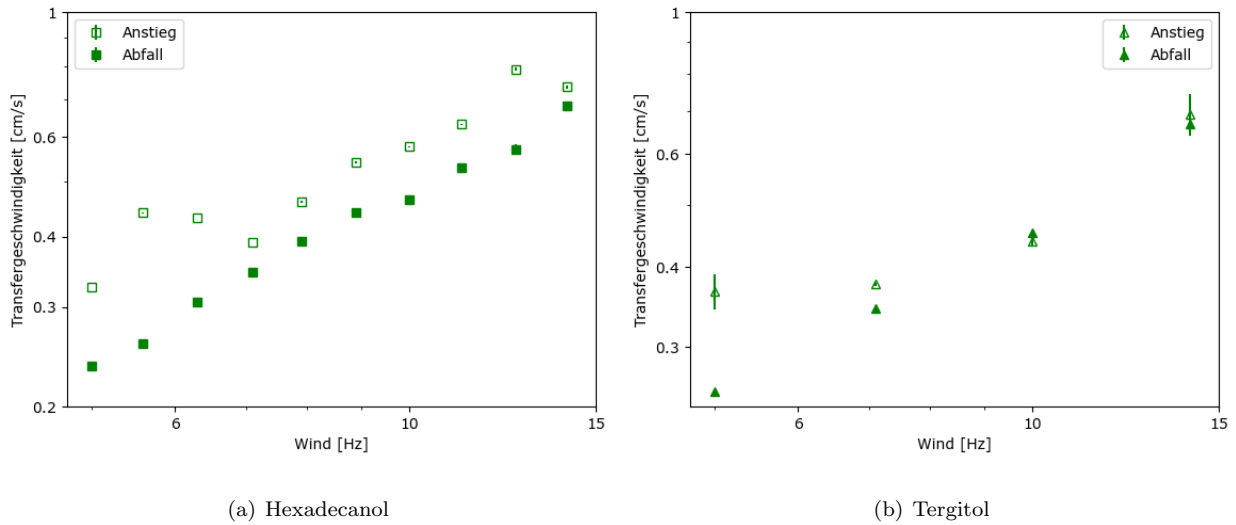


Abbildung 5.21: Transfergeschwindigkeiten für Messtage mit Filmen für 2,5-Dimethylpyrazin



Bei Hexadecanol fällt auf, dass die Werte der Transfargeschwindigkeit bei niedrigem Wind recht stark voneinander abweichen (Abbildung 5.21 (a)). Einen klar erkennbaren Grund dafür gibt es nicht. Da die Werte aus dem Abfall jedoch gut zusammenpassen, schein der Fehler bei den Werten im Anstieg zu liegen. Vermutlich hätte der Fit an den Anstieg noch verbessert werden können.

Bei den weiteren Messungen für Tergitol wurde Dimethylpyrazin nicht weiter mitgemessen, da der Tracer leer und nicht nachlieferbar war (zu sehen an den flachen Verläufen in Abbildung 5.20 (b)). Da bei nur die ersten vier Windgeschwindigkeiten für Tergitol mitgemessen werden konnten, lässt sich hier keine direkte Aussage über das Verhalten bei Aufreißen des Films treffen. Es liegt aber nahe, dass Dimethylpyrazin sich wie in den anderen Fällen auch nahezu analog zu Pyrazin verhält.

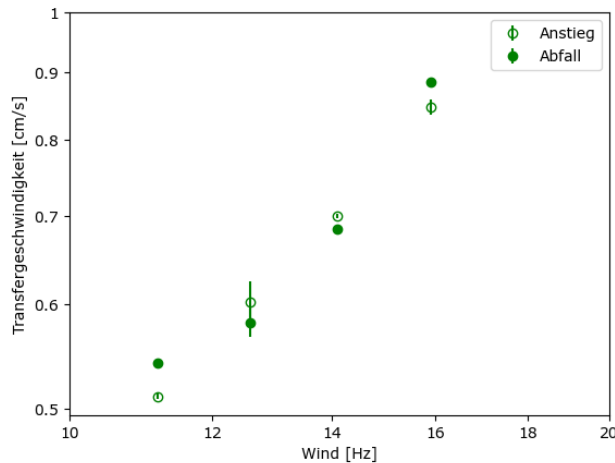


Abbildung 5.22: Transfargeschwindigkeiten für Messtag mit Olivenölfilm für 2,5-Dimethylpyrazin

Wie erwartet, ist analog zu Pyrazin auch bei Dimethylpyrazin ein kleiner Knick in den Transfargeschwindigkeitswerten bei 15,9 Hz Wind zu erkennen, der aber ebenfalls im Vergleich zu Anisol deutlich geringer ist.

### 5.3 Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Film

Um die erhaltenen Transfargeschwindigkeiten zu vergleichen, werden die jeweiligen Ergebnisse mit Film und ohne Film jeweils gegen die Windgeschwindigkeiten aufgetragen. Für die Werte der Transfargeschwindigkeiten werden jeweils die Mittelwerte aus allen berechneten Werten gebildet. Für die Berechnung der Unsicherheit wurde die Unsicherheit des Mittelwertes

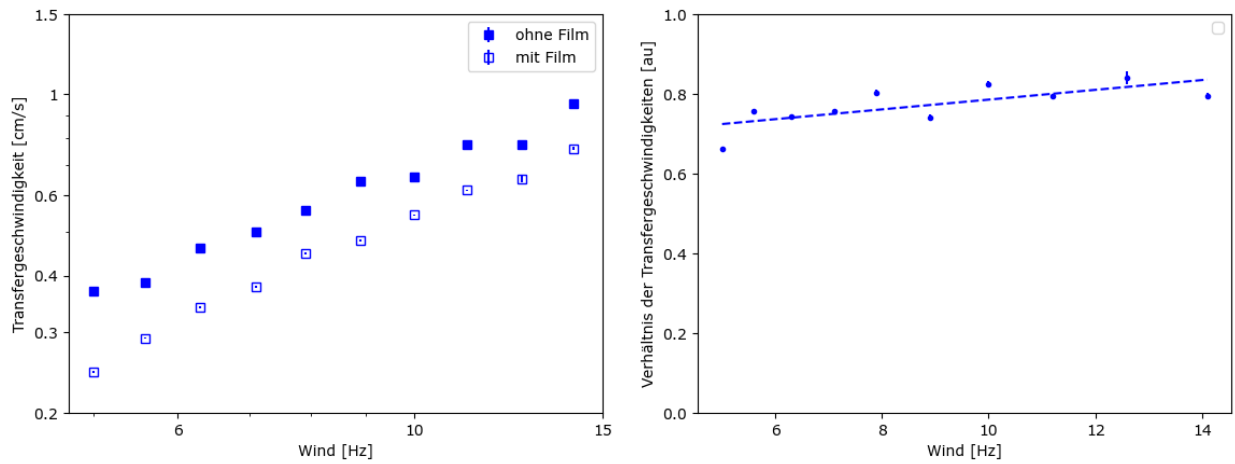
$$\Delta \bar{k} = \sqrt{\frac{\sum (k - \bar{k})^2}{n - 1}} \quad (5.3)$$

verwendet. Außerdem werden die Verhältnisse zwischen den Werten ohne und mit Film ermittelt und ebenfalls gegen den Wind geplottet (Verhältnis =  $\frac{k_{mit\ Film}}{k_{ohne\ Film}}$ ). Die Plots der Verhältnisse sind nicht doppello-  
garitmisches. Die Unsicherheit der Verhältnisse wurde mit

$$\Delta\text{Verhältnis} = \text{Verhältnis} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta k_{mit\ Film}}{k_{mit\ Film}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k_{ohne\ Film}}{k_{ohne\ Film}}\right)^2} \quad (5.4)$$

berechnet.

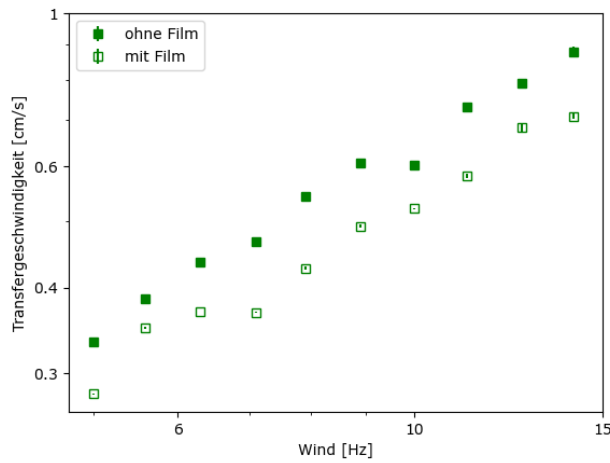
### 5.3.1 Hexadecanol



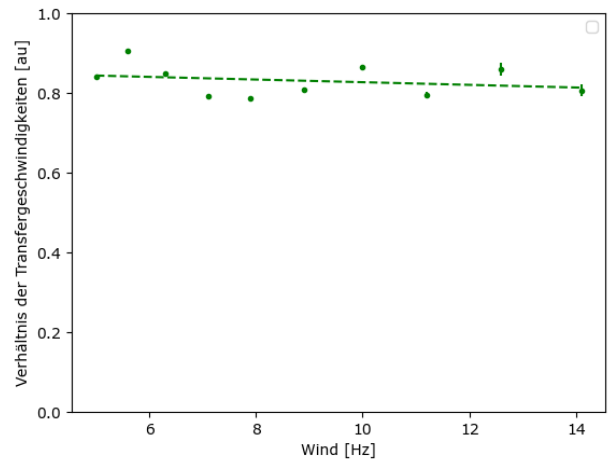
(a) Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film

(b) Verhältnis der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film

Abbildung 5.23: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Hexadecanolfilm für Pyrazin

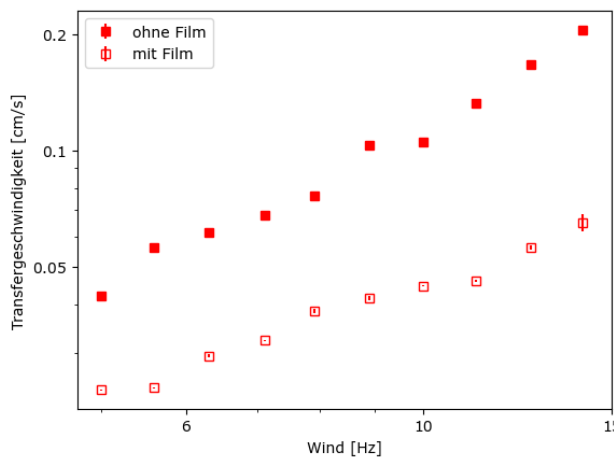


(a) Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film

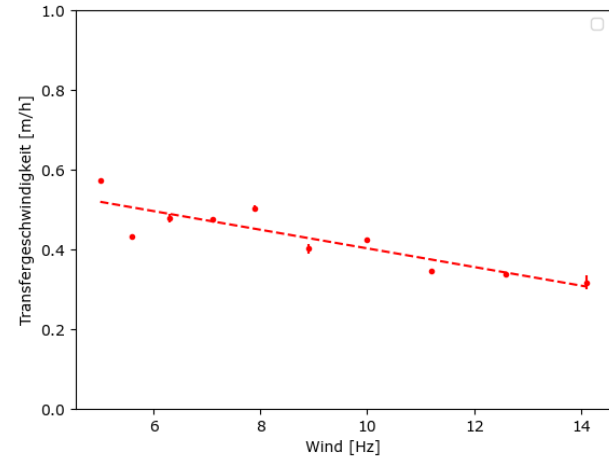


(b) Verhältnis der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film

Abbildung 5.24: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Hexadecanolfilm für 2,5-Dimethylpyrazin



(a) Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film



(b) Verhältnis der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film

Abbildung 5.25: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Hexadecanolfilm für Anisol

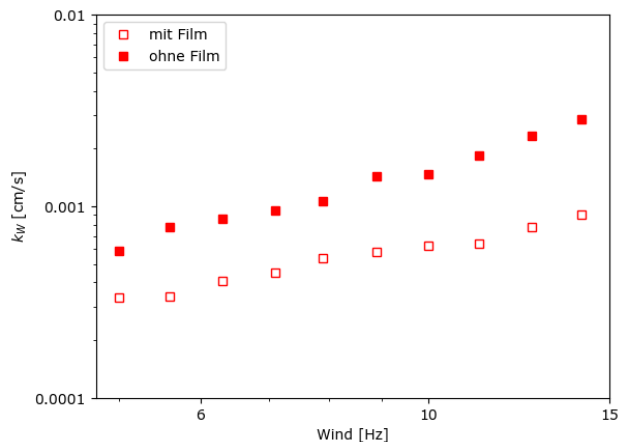


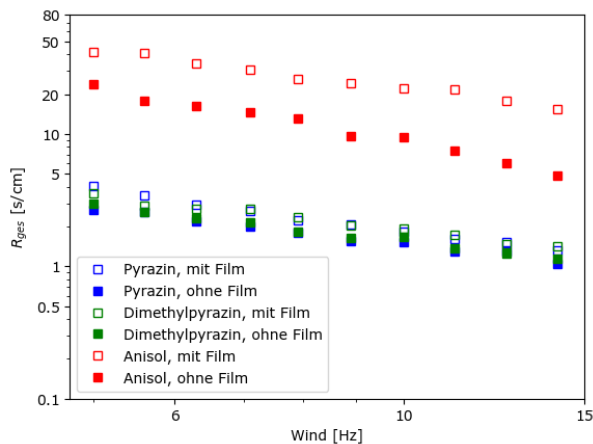
Abbildung 5.26: Transfargeschwindigkeit im Waseer von Anisol mit und ohne Hexadecanolfilm

Im Vergleich sieht man bei allen drei Tracern den Effekt des Hexadecanolfilms.

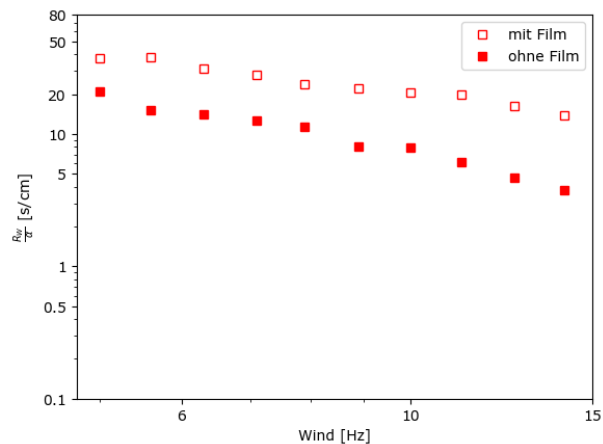
Bei Dimethylpyrazin scheint dieser recht konstant zu sein und nicht mit dem Wind anzusteigen, da der Abstand der beiden Kurven im Graph zueinander nicht größer wird, sondern für alle Windgeschwindigkeiten fast gleich bleibt. Die Verringerung der Transfargeschwindigkeiten beträgt hier knapp 20 % (Abbildung 5.24). Sehr ähnlich verhält es sich ebenfalls bei Pyrazin (Abbildung 5.23).

Bei Anisol jedoch ist ist klar erkennbar, dass der unterdrückende Effekt des Hexadecanolfilms stärker wird je stärker der Wind ist (siehe Abbildung 5.25 und 5.26). Dieser Unterschied lässt sich damit erklären, dass Anisol wasserseitig, Pyrazin und Dimethylpyrazin luftseitig kontrolliert sind. Im Schnitt liegt hier die Reduktion der Transfargeschwindigkeit bei knapp 60 %.

Betrachtet man die Transferwiderstände fällt ebenfalls auf, dass die Unterschiede zwischen den Werten mit und ohne Film bei den Pyrazinen sehr gering sind, der Effekt jedoch bei Anisol deutlich stärker ist. Mit dem Hexadecanolfilm steigen die Widerstandswerte von Anisol um fast 50% (Abbildung 5.27). Der Hexadecanolfilm hat einen deutlichen Einfluss auf den wasserseitig kontrollierten Tracer, beeinflusst die luftseitig kontrollierten Tracer aber nur sehr schwach.



(a) Alle Tracer

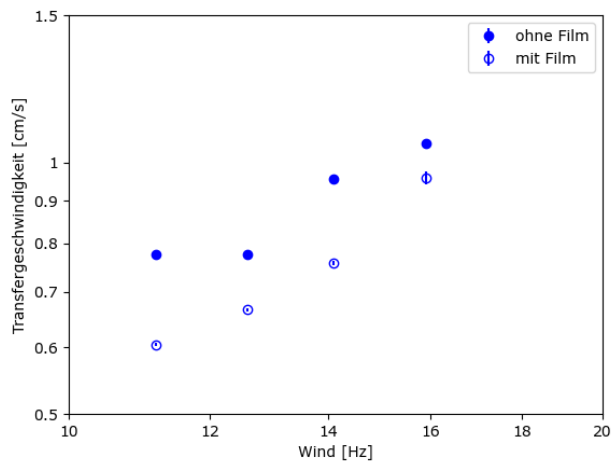


(b) Transferwiderstand Wasser

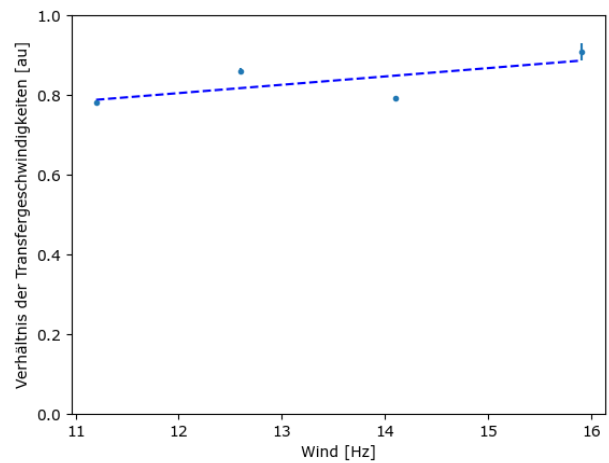
Abbildung 5.27: Vergleich der Transferwiderstände bei Hexadecanol

### 5.3.2 Olivenöl

Der Film aus Olivenöl hat in den hier durchgeführten Messungen den Wellen nur sehr wenig Stand gehalten. Der Film hat ist bereits bei einem Wind von 11,2 Hz aufgerissen, sodass sich Wellen ergeben haben. Während der Messungen wurde zwei mal 2 ml zusätzlich von der Filmlösung auf die Wasseroberfläche aufgetropft (einmal nach der ersten Messung bei 11.2 Hz, das zweite mal nach der dritten Messung bei 14.1 Hz), jedoch hat auch dies nicht zu einem stabileren Oberflächenfilm geführt, weshalb nur vier Windgeschwindigkeiten gemessen werden konnten. Ein möglicher Grund für den leicht aufreisenden Film ist, dass das Olivenöl der Filmlösung sich zersetzt hat und sich dadurch kein stabiler Film ausbilden konnte. Die Filmlösung wurde im Mai 2024 angesetzt und im Juli des selben Jahres für die Messung verwendet. Die Lösung war zum Gebrauch also 2 Monate alt und wurde im Regal des Chemielabors gelagert.

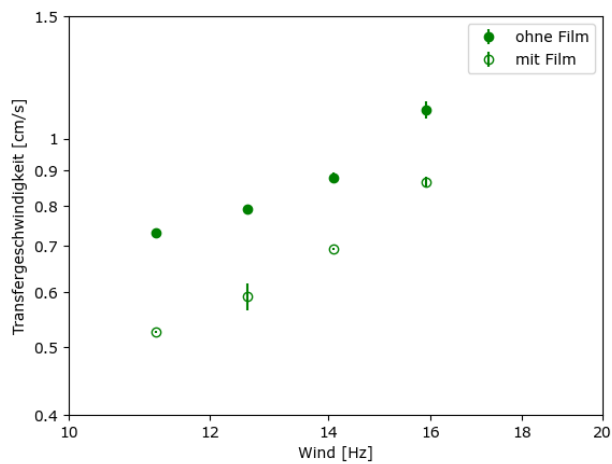


(a) Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film

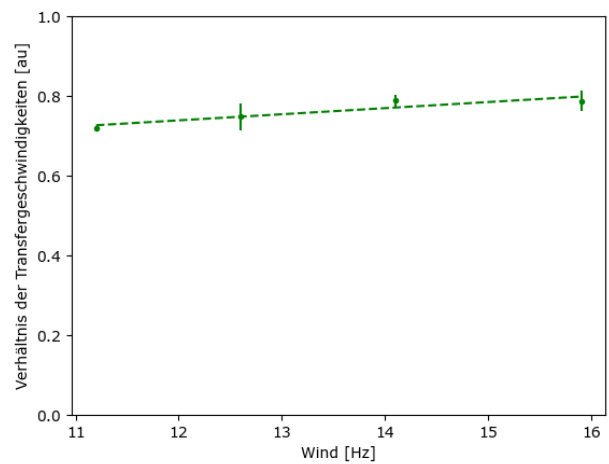


(b) Verhältnis der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film

Abbildung 5.28: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Olivenölfilm bei Pyrazin

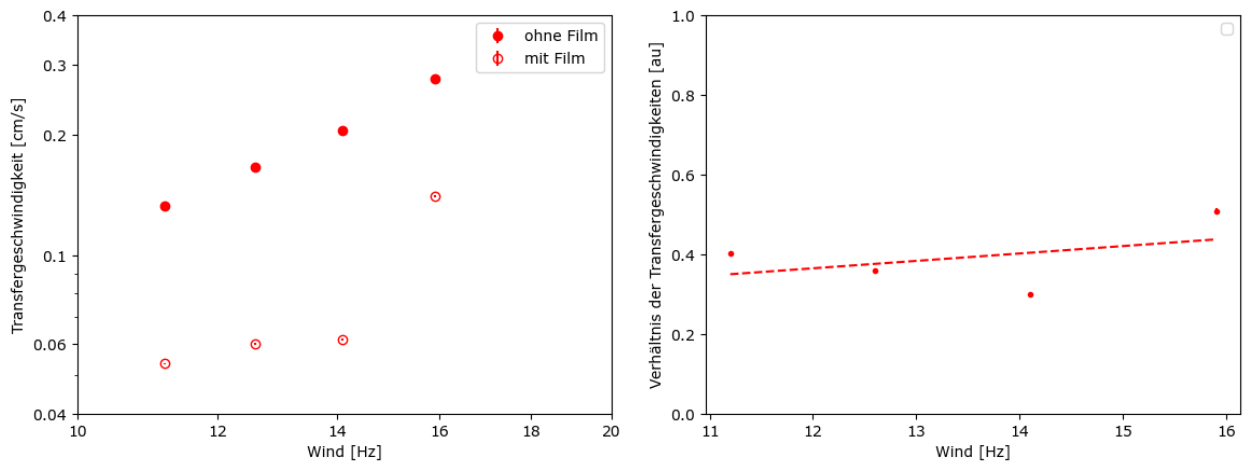


(a) Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film



(b) Verhältnis der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film

Abbildung 5.29: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Olivenölfilm bei 2,5-Dimethylpyrazin



(a) Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Film

(b) Verhältnis der Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Film

Abbildung 5.30: Vergleich der Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Olivenölfilm bei Anisol

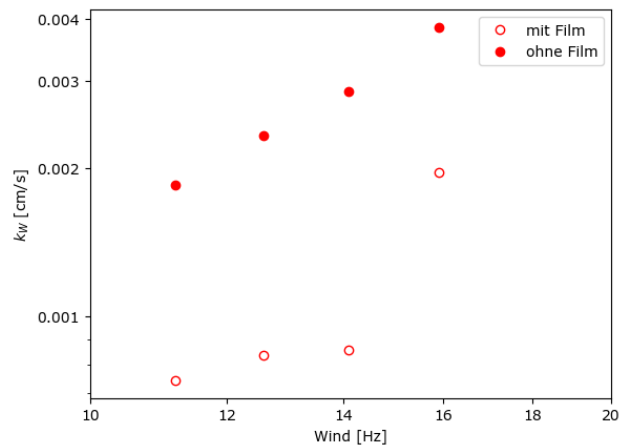
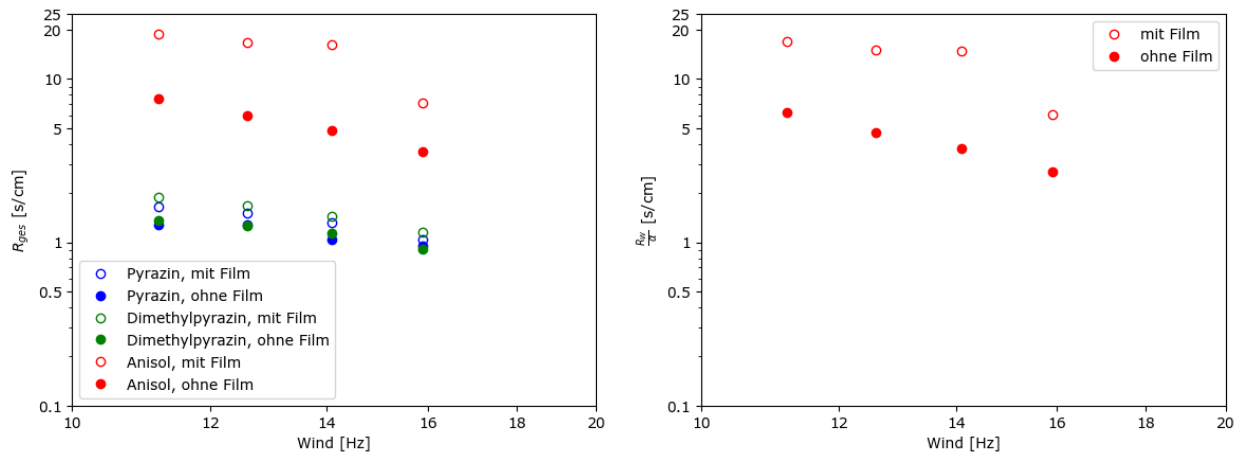


Abbildung 5.31: Transfergeschwindigkeit im Wasser von Anisol mit und ohne Olivenölfilm

Da aufgrund des schlecht funktionierenden Films nur 4 Windgeschwindigkeiten gemessen werden konnten, ist es schwierig Aussagen über den weiteren Verlauf zu treffen. Des weiteren war der Film bei den Messungen teilweise scheinbar vorhanden, an anderen Stellen war jedoch kein Film auf der Wasseroberfläche, sodass sich eine Art „Halbfilm“ ergab.

Jedoch lässt sich selbst mit einem zerrissenen Film eine Verlangsamung der Transfergeschwindigkeiten erkennen, die zumindest im hier gemessenen Windgeschwindigkeitsbereich relativ konstant ist. Auch hier

liegt der Effekt der Filme bei gut 20 % für die Pyrazine (Abbildung 5.28 und 5.29) und knapp 60 % für Anisol (Abbildung 5.30 und 5.31).



(a) Alle Tracer

(b) Transferwiderstand Wasser

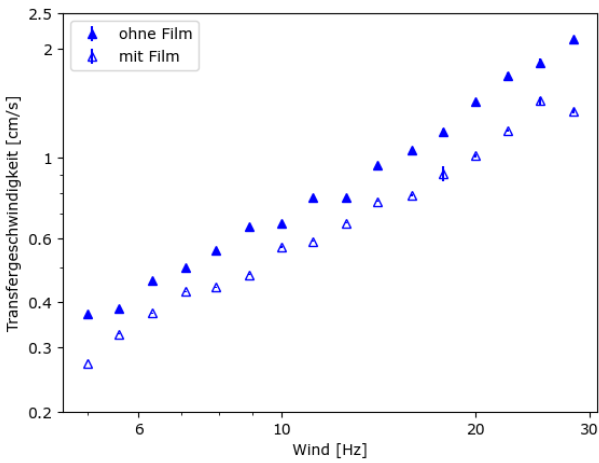
Abbildung 5.32: Vergleich der Transferwiderstände bei Olivenöl

Auch hier ist der Effekt des Films deutlich zu sehen. Bei Betrachtung von Abbildung 5.32 ist zu erkennen, dass sich die Transferwiderstände von Anisol bei Verwendung des Olivenölfilms mehr als verdoppelt haben. Der Einfluss auf die Pyrazine ist vergleichsweise wieder recht gering.

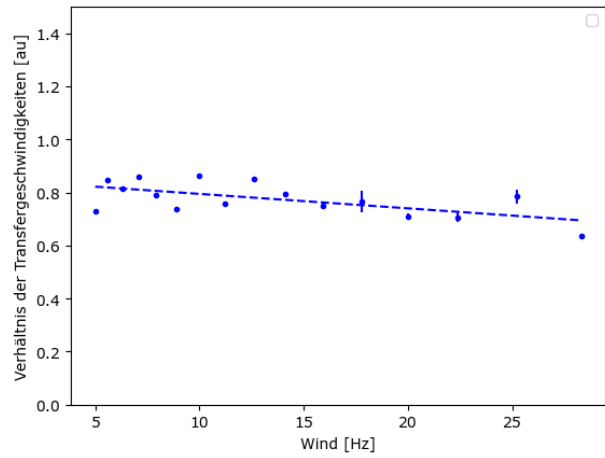
### 5.3.3 Tergitol

Der unterdrückende Effekt des Tergitolfilms ist klar zu erkennen. Den Verläufen der Transfervgeschwindigkeiten nach in Abbildungen 5.33 bis 5.36 scheint der Effekt bei höheren Windgeschwindigkeiten stärker zu sein als bei niedrigen Windgeschwindigkeiten. Wie zuvor bei Hexadecanol und Olivenöl auch liegen die Verringerungen der Transfervgeschwindigkeiten bei 20 % für die luftseitig kontrollierten Pyrazine und 60 % für das wasserseitig kontrollierte Anisol.



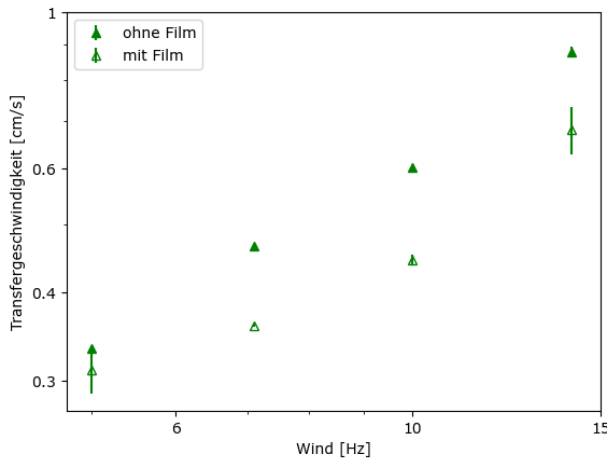


(a) Transferringeschwindigkeiten mit und ohne Film

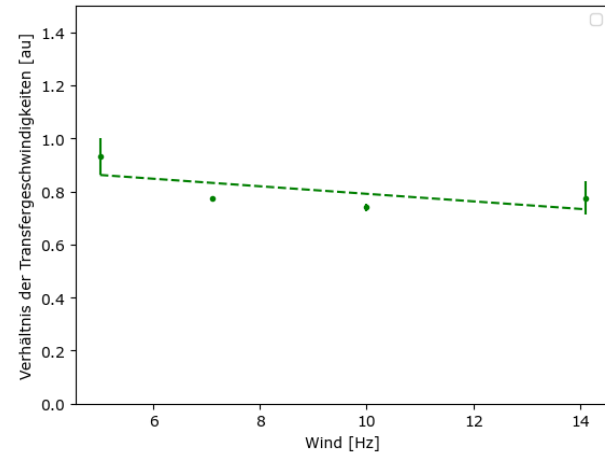


(b) Verhältnis der Transferringeschwindigkeiten mit und ohne Film

Abbildung 5.33: Vergleich der Transferringeschwindigkeiten mit und ohne Tergitofilm für Pyrazin

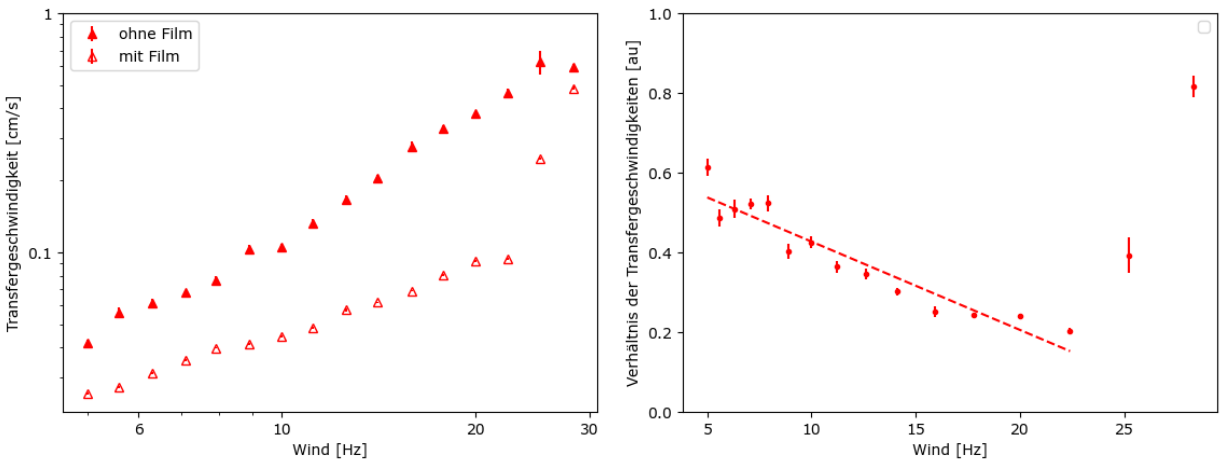


(a) Transferringeschwindigkeiten mit und ohne Film



(b) Verhältnis der Transferringeschwindigkeiten mit und ohne Film

Abbildung 5.34: Vergleich der Transferringeschwindigkeiten mit und ohne Tergitofilm für 2,5-Dimethylpyrazin



(a) Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film

(b) Verhältnis der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Film

Abbildung 5.35: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Tergitolfilm für Anisol

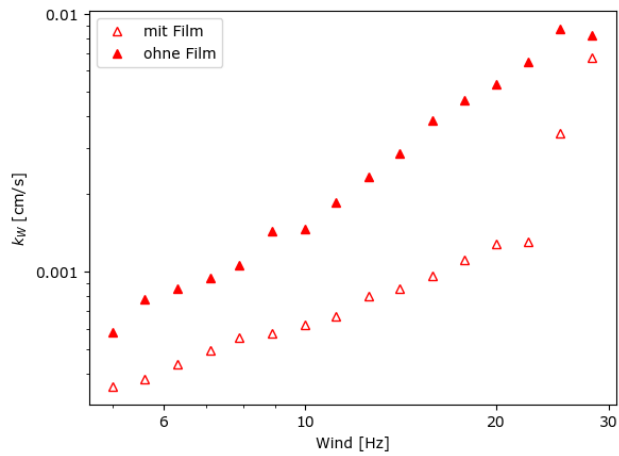
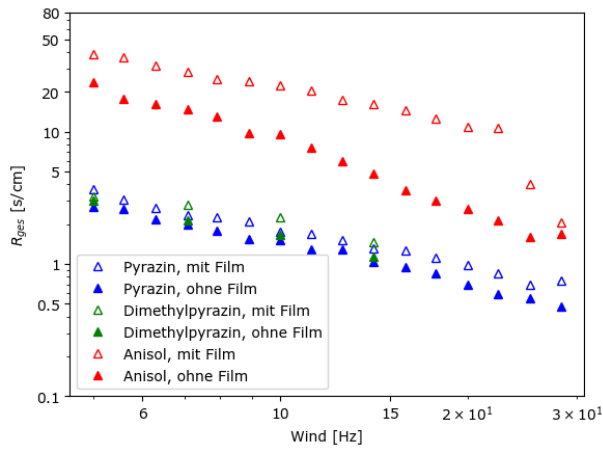
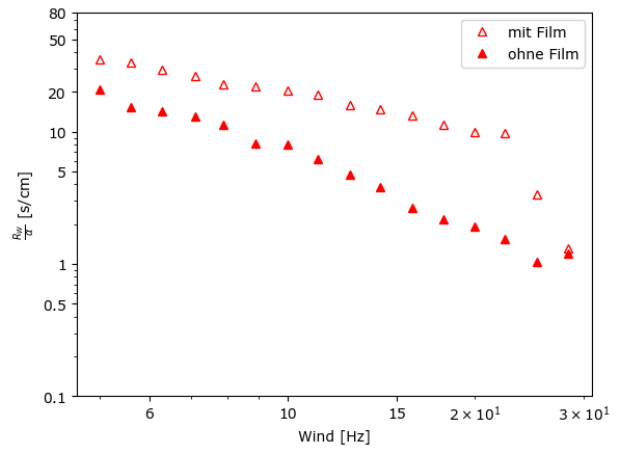


Abbildung 5.36: Transfargeschwindigkeit im Wasser von Anisol mit und ohne Hexadecanolfilm

Hier ist wie bei Hexadecanol zu sehen, dass der Effekt bei Anisol deutlich am stärksten ist. Der Film hält hier bis ungefähr 23 Hz, bevor er seinen Effekt für Anisol verliert und die Transfargeschwindigkeiten etwa wieder auf die Werte ohne Film ansteigen. Deshalb wurde hier der lineare Fit der Verhältnisse nur bis zu dieser Windgeschwindigkeit angelegt.



(a) Alle Tracer



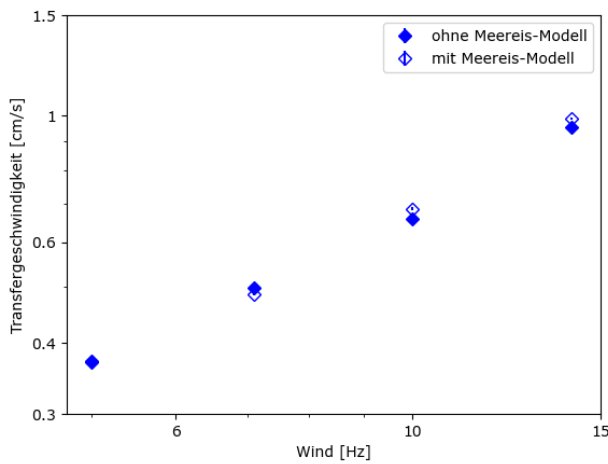
(b) Transferwiderstand Wasser

Abbildung 5.37: Vergleich der Transferwiderstände bei Tergitol

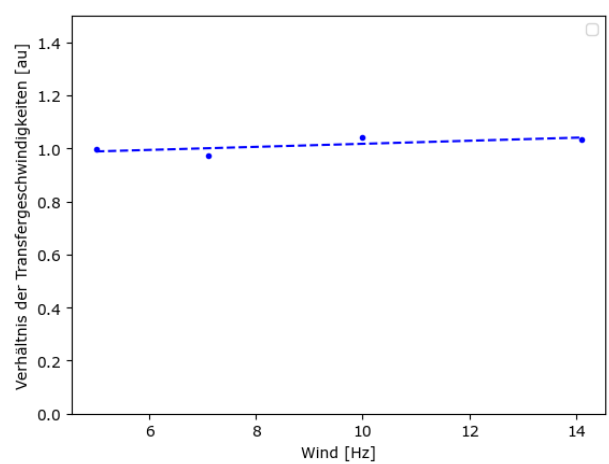
Die Werte der Transferwiderstände und ihre Verläufe für die Tracer (siehe Abbildung 5.37) verhalten sich hier nahezu analog zu denen des Hexadecanolfilms.

### 5.3.4 Meereis-Modell

Für die Messungen mit dem Meereis-Modell wurde nur Pyrazin verwendet, welches als Lösung in den Kanal eingegeben wurde.

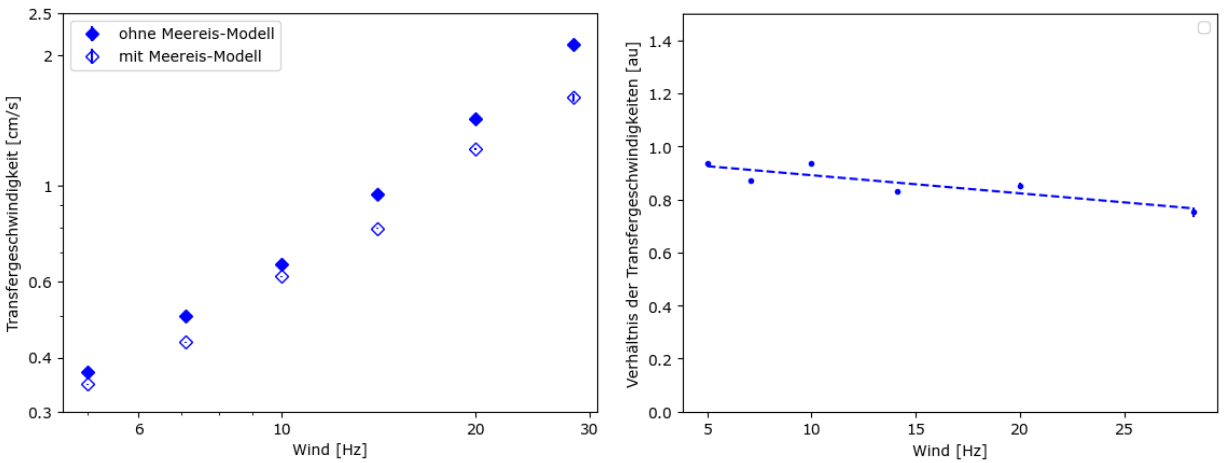


(a) Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell



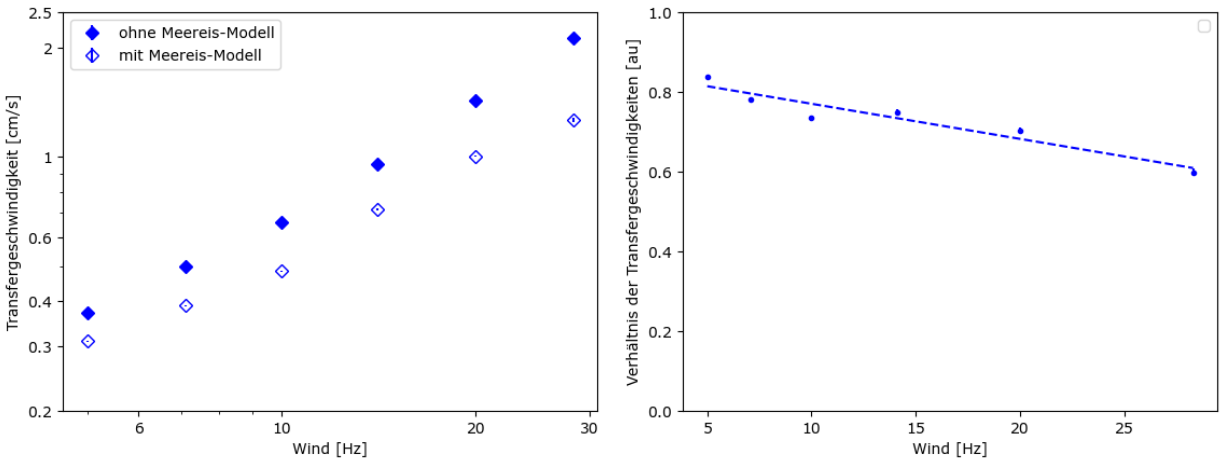
(b) Verhältnis der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell

Abbildung 5.38: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell bei 100 Schollen



(a) Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell (b) Verhältnis der Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell

Abbildung 5.39: Vergleich der Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell bei 700 Schollen



(a) Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell (b) Verhältnis der Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell

Abbildung 5.40: Vergleich der Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell bei 1705 Schollen

An den geplotteten Verläufen lässt sich erkennen, dass die Schollen einen Einfluss auf die Transfergeschwindigkeit des Tracers haben. Dieser Einfluss nimmt mit steigenden Windgeschwindigkeiten und größerer Anzahl an Schollen zu. Für die Verwendung von 100 Schollen ist kein Effekt zu beobachten (vergleiche Abbildung 5.38). Dies ist nicht verwunderlich, da hierbei gerade einmal knapp 2 % der Wasseroberfläche bedeckt

sind. Bei 700 Schollen (Abbildung 5.39) ist ein geringer Effekt zu sehen, doch auch hier beträgt die Reduktion der Transfergeschwindigkeiten nur knapp 10 %, was keinen großen Unterschied ausmacht. Bei 1705 Schollen liegt die Verlangsamung der Transfergeschwindigkeiten bei knapp 20 % (zu sehen in Abbildung 5.40). Die geringeren Transfergeschwindigkeiten sind dabei auf die geringere Wasseroberfläche zurückzuführen, welche durch die Bedeckung durch die Schollen entsteht. Es liegt nahe, dass der Gasaustausch an Stellen, an denen die Wasseroberfläche von Schollen bedeckt ist, verhindert wird, sich am Austauschprozess an freien Oberflächenstellen aber nichts ändert. Außerdem nimmt der Effekt mit zunehmender Anzahl der verwendeten Schollen ebenfalls zu, wobei jedoch bei 1705 Schollen weniger als 40 % der Oberfläche bedeckt waren. Im Vergleich zu den anderen verwendeten Filmen jedoch ist der Einfluss des Meereis-Modells am geringsten. Das die Schollen einen Teil der Tracer aus der Luft aufgenommen haben, ist dabei unwahrscheinlich. Um bessere Aussagen diesbezüglich treffen zu können, müsste jedoch der genaue Bedeckungsgrad bestimmt werden. Zudem müssten durch Termographiemessungen Veränderungen am Muster der Wasseroberfläche untersucht werden, da die Platten ein wenig aus dem Wasser herausragen. Diese Daten liegen zwar vor, die Auswertung jedoch wäre zu viel für diese Arbeit.

#### 5.4 Vergleich der Transfergeschwindigkeiten zu früheren Messungen

Da die Werte der Schubspannungsgeschwindigkeit nicht vorliegen, noch die selben Tracer gemessen wurden, sind die hier gewonnenen Werte nur bedingt mit früheren Messungen vergleichbar.

Die Transfergeschwindigkeiten steigen mit zunehmendem Wind linear (bei doppellogarithmischer Darstellung) an. In die Einheit  $\frac{cm}{h}$  umgerechnet, befinden sich die Transfergeschwindigkeiten in einer Größenordnung von  $10^3$  für die Pyrazine und  $10^2$  für Anisol. Dies stimmt mit den luftseitigen Transfergeschwindigkeiten für hochlösliche Stoffe in [Mes+15] überein, die ebenfalls am Heidelberg Aeolotron gemessen wurden. Für die wasserseitigen Transfergeschwindigkeiten von Anisol liegen die Werte im Bereich von  $10^0$  bis  $10^1$ . Auch dies deckt sich mit den Messungen aus [Mes+15] zu  $N_2O$ , welches ebenfalls eine geringe Löslichkeit besitzt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Transfergeschwindigkeiten von drei Tracern, Anisol, Pyrazin und 2,5-Dimethylpyrazin, bei niedrigen und mittleren Windgeschwindigkeiten durch Invasionsmessung auf der Luftseite gemessen. Es wurden Messungen ohne Oberflächenfilme und mit 3 Oberflächenfilmen, Hexadecanol, Olivenöl und Tergitol sowie mit einem Meereis-Modell mit drei verschiedenen Bedeckungsgraden durchgeführt und die Ergebnisse der Tracer verglichen, um den Einfluss von Oberflächenfilmen auf Gasaustauschprozesse näher zu beleuchten. Nach Aufnahme der Daten wurde zunächst ein Fit bestehend aus den Referenzspektren der Tracer sowie einem Polynom 2. Grades an die Daten vorgenommen, um die Anteile der einzelnen Tracer im Absorbanzspektrum bestimmen zu können. Anhand dieser individuellen zeitlichen Absorptionsspektren konnte dann die Transfergeschwindigkeit durch weitere Fits an die Anstiege und Abfälle der Konzentrationverläufe ermittelt werden. Die Messungen mit Oberflächenfilm verliefen dabei gleich zu denen ohne Film. Ein großes Problem dabei stellte jedoch das Olivenöl dar. Dieses bildete einen Film, der schnell während der Messungen aufriss, wodurch sich Wellen bildeten. Selbst nach zwei Versuchen, den Film durch weiteres Aufgeben der Filmlösung zu verstärken, riss der Film erneut. Da der Film schlechter standhielt als in anderen, zuvor durchgeführten Experimenten liegt das Problem sehr wahrscheinlich in der Filmlösung selbst, beispielsweise durch Schlechtwerden des Olivenöls.

Auf der Luftseite wurde vor der Aufteilung in die einzelnen Tracer die Absorption mithilfe des Lampen- und Dunkelspektrums ermittelt. An die individuellen Absorbanzverläufe der Tracer wurden dann für den Anstieg sowie den Abfall auf der Massenbilanz des Boxmodells basierende Fits angelegt, anhand deren Fitparameter die Transfergeschwindigkeiten ermittelt werden konnten. Ein Problem hierbei war, dass die Tracer, speziell Pyrazin und 2,5-Dimethylpyrazin, oft nicht in ein stabiles Plateau erreichten, sondern teilweise Spitzen und andere ungewollte Formen aufweisen. Dies war vor allem anfänglich bei Pyrazin ein Problem, bevor es als Lösung in den Kanal gegeben wurde. Grund hierfür ist wahrscheinlich, dass die Druckluft, über die die Tracer in den Kanal gegeben wurden, bestimmte Wege in den Flaschen bevorzugte und vor allem durch diese strömte, wodurch sich Kanäle ausbildeten. Da die Druckluft vor allem durch diese Kanäle strömte, wurde das Pyrazin dort sehr schnell verdampft im Vergleich zur restlichen Flasche, wodurch der Fluss nicht zwingend konstant war.

Trotz Unterdrückung der Wellenbildung durch die Oberflächenfilme ist die Verlangsamung der Transfergeschwindigkeiten sehr gering. Für die luftseitig kontrollierten Tracer Pyrazin und 2,5-Dimethylpyrazin liegt sie bei maximal 20 % für alle drei Oberflächenfilme. Für das wasserseitig kontrollierte Anisol liegt sie bei maximal 60 %. Beim Meereis-Modell haben 100 Schollen keinen erkennbaren Einfluss auf die Transfer-

geschwindigkeit. Bei 700 Schollen, was einer Oberflächenbedeckung von maximal 15 % entspricht, liegt der Effekt bei ungefähr 10%. Bei 1705 Schollen, die etwas weniger als 36 % bedecken, liegt die Reduktion der Transfargeschwindigkeiten bei knapp 40 %. Die Reduktion entspricht also in etwa der Bedeckung der Wasseroberfläche. Dabei muss jedoch bedacht werden, dass die Schollen sich teilweise überlagerten und somit die tatsächliche Bedeckung der Wasseroberfläche geringer ist.

Im Hinblick auf dieses Thema ist die Frage nach der Schubspannungsgeschwindigkeit und in wiefern die Oberflächenfilme diese beeinflussen relevant. Die korrektere Darstellungsweise für die hier gemessenen Daten wäre das Auftragen der Transfargeschwindigkeit gegen die Schubspannungsgeschwindigkeit. Bei gleicher Windgeschwindigkeit wirkt wahrscheinlich nicht die gleiche Schubspannungsgeschwindigkeit mit und ohne Verwendung von Oberflächenfilmen. Die Filme unterdrücken die Wellenbildung und verhindern so den form drag, also das Anschieben der Wellen durch den Wind. In dieser Darstellung würden also die Datenpunkte in den Graphiken weiter nach links verschoben werden, wodurch der Abstand zu den Werten mit Oberflächenfilm weiter verringert werden würde. Die hier berechneten Verhältnisse zwischen den Werten mit und ohne Film sind also als untere Grenze anzusehen und sind in Wahrheit wahrscheinlich noch größer. Des Weiteren müsste für das Meereis-Modell der Bedeckungsgrad der Wasseroberfläche genauer bestimmt werden, um bessere Aussagen bezüglich dessen Einflusses treffen zu können. Dafür auch interessant wäre es, sich durch Thermographiemessungen Veränderungen im Muster der Wasseroberfläche und weitere Effekte des Eises genauer anzusehen.

## 7 Anhang

### 7.1 Messzeiten

Messtag	Windgeschwindigkeit [Hz]	Eingabe [min]	Ruhephase [min]
A	5	30	20
	7.1	30	20
	10	25	20
	14.1	25	20
	20	20	20
	28.3	20	20
B	5.6	30	20
	7.9	30	20
	11.2	25	20
	15.9	25	20
	22.4	20	20
C	6.3	30	20
	8.9	30	20
	12.6	25	20
	17.8	25	20
	25.2	20	20

Tabelle 2: Messzeiten für verschiedene Windgeschwindigkeiten (Messungen ohne Film, mit Tergitol und Meereis-Modell)



Messtag	Windgeschwindigkeit [Hz]	Eingabe [min]	Ruhephase [min]
A	5	50	30
	7.1	45	25
	10	40	20
	11.2	35	20
B	5.6	45	30
	7.9	40	25
	12.6	35	25
C	6.3	40	30
	8.9	35	25
	14.1	30	25

Tabelle 3: Messzeiten für verschiedene Windgeschwindigkeiten mit Hexadecanol-Film

Windgeschwindigkeit [Hz]	Eingabe [min]	Ruhephase [min]
11.2	35	25
12.6	35	25
14.1	30	20
15.9	30	20
17.8	25	20

Tabelle 4: Messzeiten für verschiedene Windgeschwindigkeiten mit Olivenöl-Film

## 7.2 Ohne Film

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]			Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg	Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	$1.4651 \pm 0.0049$	$2.0450 \pm 0.0014$	5	$0.9168 \pm 0.0062$	$1.6123 \pm 0.0021$
7.1	$2.5937 \pm 0.0065$	$2.7844 \pm 0.0020$	7.1	$2.1426 \pm 0.0068$	$2.2676 \pm 0.0042$
10	$4.5777 \pm 0.0116$	$4.1273 \pm 0.0028$	10	$3.2920 \pm 0.0130$	$3.1368 \pm 0.0038$
14.1	$8.2793 \pm 0.0178$	$7.7629 \pm 0.0088$	14.1	$7.4292 \pm 0.0207$	$6.1122 \pm 0.0160$
20	$16.8893 \pm 0.0570$	$13.0141 \pm 0.0559$	20	$15.3145 \pm 0.0539$	$9.7043 \pm 0.1126$
28.3	$23.1158 \pm 0.2199$	$17.3594 \pm 0.0986$	28.3	$23.7583 \pm 0.5821$	-

Tabelle 5: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Anisol für Messtag A

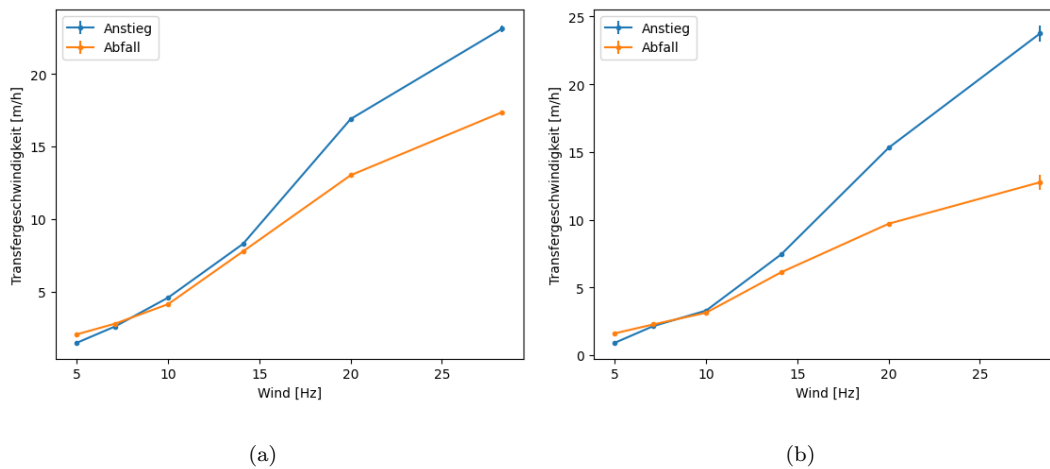


Abbildung 7.1: Transfergeschwindigkeiten aufgetragen gegen den Wind für Anisol für Messtag A

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]			Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg	Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5.6	$1.8066 \pm 0.0064$	$2.0769 \pm 0.0014$	5.6	$2.0432 \pm 0.0104$	$2.1751 \pm 0.0043$
7.9	$2.5712 \pm 0.0067$	$2.9303 \pm 0.0024$	7.9	$2.6701 \pm 0.0109$	$2.8206 \pm 0.0062$
11.2	$5.0135 \pm 0.0169$	$4.6209 \pm 0.0052$	11.2	$4.8965 \pm 0.0270$	$4.5912 \pm 0.0145$
15.9	$10.9555 \pm 0.0289$	$8.8064 \pm 0.0227$	15.9	$11.1786 \pm 0.0522$	$8.9003 \pm 0.1299$
22.4	$20.7603 \pm 0.0808$	$12.7692 \pm 0.1207$	22.4	$20.0005 \pm 0.2174$	$13.5279 \pm 0.6257$

Tabelle 6: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Anisol für Messtag B

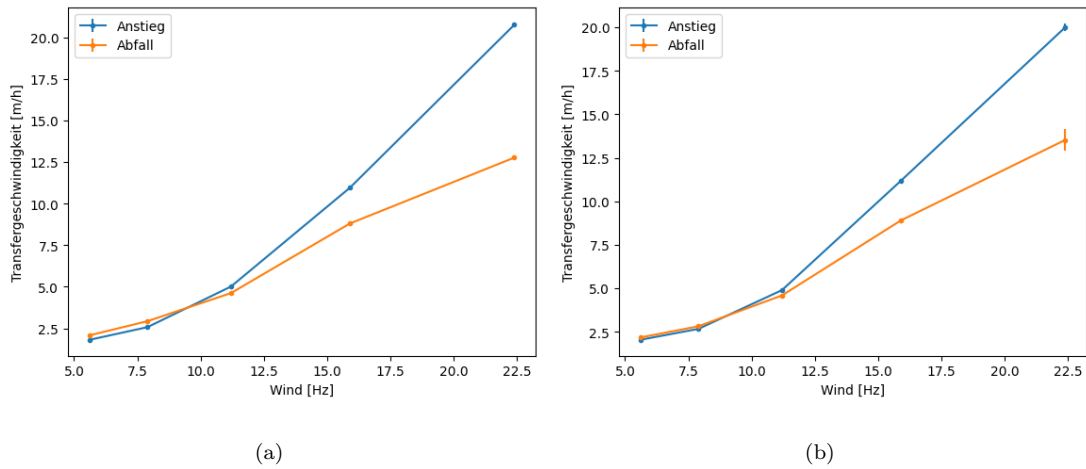


Abbildung 7.2: Transfargeschwindigkeiten aufgetragen gegen den Wind für Anisol für Messtag B

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]			Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg	Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
6.3	$1.7480 \pm 0.0064$	$2.1185 \pm 0.0019$	6.3	$2.7186 \pm 0.0477$	$2.2791 \pm 0.0056$
8.9	$3.1487 \pm 0.0100$	$3.9171 \pm 0.0034$	8.9	$4.4938 \pm 0.0950$	$3.3090 \pm 0.0097$
12.6	$7.0464 \pm 0.0190$	$5.3690 \pm 0.0061$	12.6	$6.2370 \pm 0.0526$	$5.3362 \pm 0.0157$
17.8	$13.8388 \pm 0.0352$	$9.8721 \pm 0.0432$	17.8	$13.9446 \pm 0.2677$	$10.0909 \pm 0.0701$
25.2	$26.7384 \pm 0.1472$	$15.1760 \pm 0.6688$	25.2	$25.8644 \pm 2.4774$	-

Tabelle 7: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Anisol für Messtag C

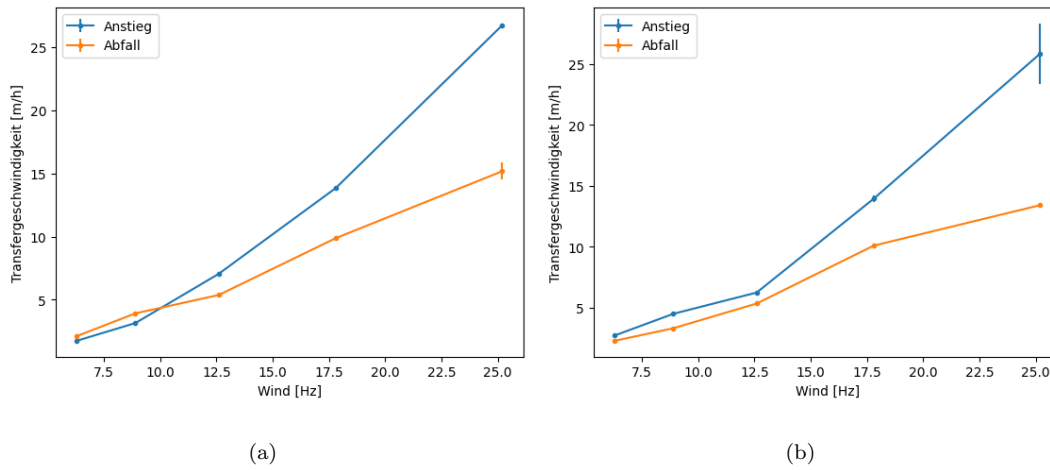


Abbildung 7.3: Transfargeschwindigkeiten aufgetragen gegen den Wind für Anisol für Messtag C

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]			Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg	Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	$12.8679 \pm 0.0122$	$11.9150 \pm 0.0051$	5	$11.4429 \pm 0.0093$	$11.8299 \pm 0.0043$
7.1	$18.5029 \pm 0.0224$	$16.1274 \pm 0.0131$	7.1	$16.1255 \pm 0.0129$	$16.2920 \pm 0.0083$
10	$22.5384 \pm 0.0292$	$21.7717 \pm 0.0292$	10	$22.7034 \pm 0.0222$	$19.6952 \pm 0.0285$
14.1	$34.7807 \pm 0.0710$	$30.4900 \pm 0.0615$	14.1	$33.1337 \pm 0.5312$	$28.1772 \pm 0.0582$
20	$45.7544 \pm 0.1852$	$40.8711 \pm 0.1752$	20	$46.9025 \pm 0.1515$	$41.0282 \pm 0.1424$
28.3	$79.0576 \pm 0.4176$	$76.9956 \pm 0.5784$	28.3	$73.7282 \pm 0.5216$	$66.7897 \pm 5.4749$

Tabelle 8: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag A

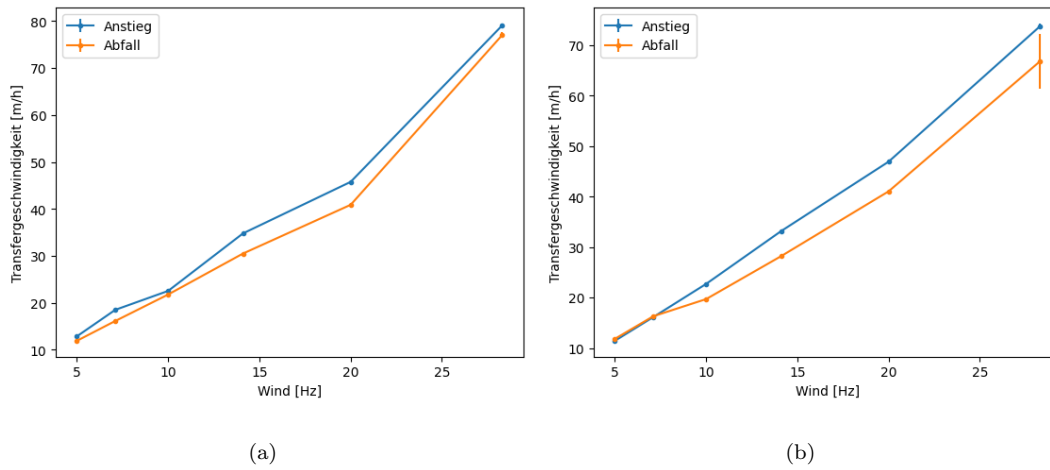
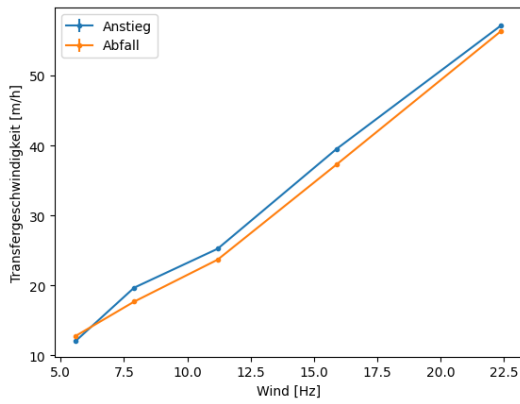


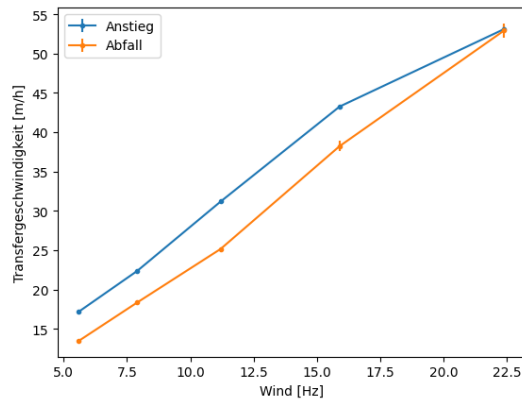
Abbildung 7.4: Transfergeschwindigkeiten aufgetragen gegen den Wind für 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag A

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]			Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg	Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5.6	$12.0788 \pm 0.0119$	$12.7853 \pm 0.0070$	5.6	$17.1981 \pm 0.0400$	$13.4869 \pm 0.0059$
7.9	$19.6640 \pm 0.0149$	$17.6691 \pm 0.0137$	7.9	$22.3596 \pm 0.0623$	$18.3490 \pm 0.0141$
11.2	$25.2348 \pm 0.0248$	$23.6763 \pm 0.0245$	11.2	$31.1916 \pm 0.1199$	$25.1632 \pm 0.0361$
15.9	$39.5174 \pm 0.901$	$37.2972 \pm 0.0895$	15.9	$43.2646 \pm 0.2294$	$38.2343 \pm 0.6566$
22.4	$57.1769 \pm 0.2747$	$56.376 \pm 0.2820$	22.4	$53.1169 \pm 0.4250$	$52.9361 \pm 0.8906$

Tabelle 9: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag B



(a)

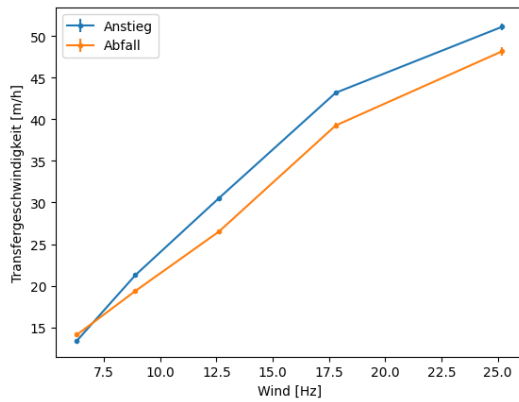


(b)

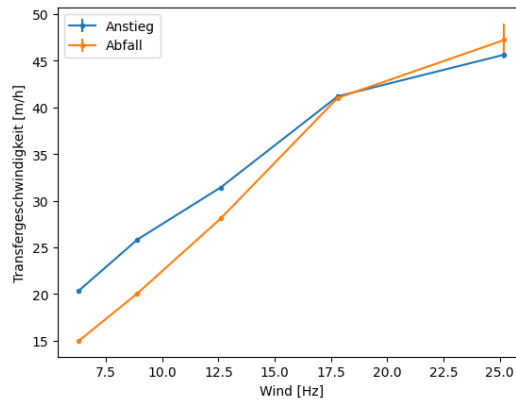
Abbildung 7.5: Transfergeschwindigkeiten aufgetragen gegen den Wind für 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag B

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]			Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg	Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
6.3	$13.3199 \pm 0.0162$	$14.1038 \pm 0.0091$	6.3	$20.3729 \pm 0.0532$	$14.8737 \pm 0.0091$
8.9	$22.1845 \pm 0.0240$	$19.3690 \pm 0.0230$	8.9	$25.8431 \pm 0.0874$	$20.0733 \pm 0.0159$
12.6	$30.2489 \pm 0.0454$	$26.4771 \pm 0.0751$	12.6	$31.4247 \pm 0.1287$	$25.9639 \pm 0.0372$
17.8	$43.2291 \pm 0.1568$	$39.2561 \pm 0.2783$	17.8	$41.1893 \pm 0.2519$	$41.0213 \pm 0.2724$
25.2	$51.2464 \pm 0.3957$	$48.1800 \pm 0.4968$	25.2	$45.6523 \pm 0.4227$	$47.2289 \pm 1.7708$

Tabelle 10: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag C



(a)

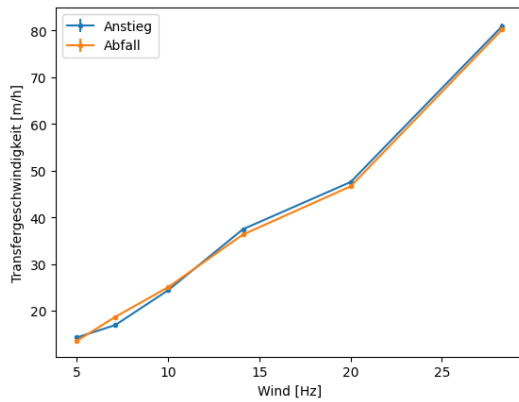


(b)

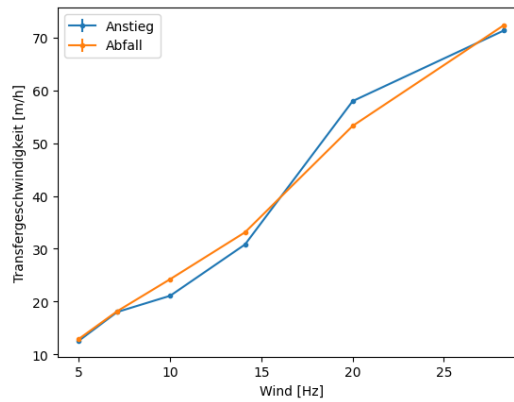
Abbildung 7.6: Transfargeschwindigkeiten aufgetragen gegen den Wind für 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag C

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]			Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg	Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	$14.2661 \pm 0.0423$	$13.5472 \pm 0.0026$	5	$12.6093 \pm 0.0262$	$12.9596 \pm 0.0046$
7.1	$16.9114 \pm 0.0294$	$18.6603 \pm 0.0061$	7.1	$18.0408 \pm 0.0458$	$18.1897 \pm 0.0070$
10	$24.3918 \pm 0.1047$	$25.0404 \pm 0.0162$	10	$21.1050 \pm 0.0648$	$24.2478 \pm 0.0188$
14.1	$37.4552 \pm 0.1579$	$36.3137 \pm 0.0657$	14.1	$30.8082 \pm 0.1188$	$33.1135 \pm 0.0502$
20	$47.5644 \pm 0.3993$	$46.6427 \pm 0.1696$	20	$57.9417 \pm 0.2033$	$53.2512 \pm 0.1094$
28.3	$80.9289 \pm 0.5855$	$80.2360 \pm 0.3842$	28.3	$71.3226 \pm 0.5081$	$72.3423 \pm 0.2867$

Tabelle 11: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag A



(a)



(b)

Abbildung 7.7: Transfargeschwindigkeiten aufgetragen gegen den Wind für Pyrazin für Messtag A

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]			Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg	Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5.6	$10.7923 \pm 0.0567$	$15.2437 \pm 0.0153$	5.6	$14.6235 \pm 0.0638$	$14.8315 \pm 0.0066$
7.9	$20.4766 \pm 0.0617$	$20.9451 \pm 0.0078$	7.9	$18.6809 \pm 0.0878$	$20.2375 \pm 0.0133$
11.2	$30.3389 \pm 0.0889$	$27.8287 \pm 0.0267$	11.2	$26.8000 \pm 0.1673$	$26.6887 \pm 0.0283$
15.9	$38.6499 \pm 0.3251$	$37.5463 \pm 0.2324$	15.9	$37.3196 \pm 0.3072$	$38.1467 \pm 0.1300$
22.4	$65.0972 \pm 0.4364$	$70.0776 \pm 0.1416$	22.4	$57.9354 \pm 0.9716$	$48.1904 \pm 1.0906$

Tabelle 12: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag B



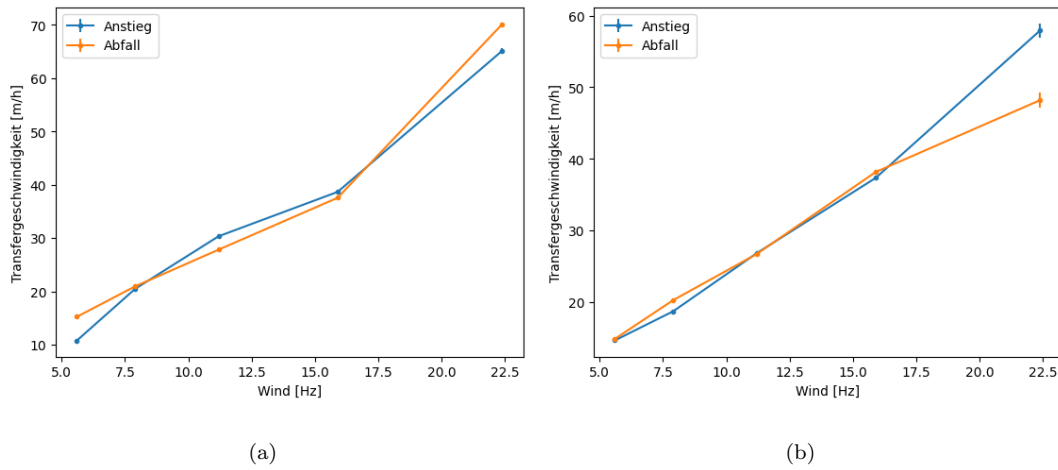


Abbildung 7.8: Transfargeschwindigkeiten aufgetragen gegen den Wind für Pyrazin für Messtag B

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]			Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg	Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
6.3	$16.1647 \pm 0.0521$	$16.2922 \pm 0.0058$	6.3	$16.7522 \pm 0.0766$	$16.8609 \pm 0.0081$
8.9	$24.6401 \pm 0.1150$	$22.5124 \pm 0.0205$	8.9	$22.8940 \pm 0.1192$	$22.8074 \pm 0.0181$
12.6	$22.9841 \pm 0.1205$	$31.0738 \pm 0.0301$	12.6	$28.2605 \pm 0.1765$	$29.4373 \pm 0.0467$
17.8	$44.7741 \pm 0.3033$	$42.0868 \pm 0.0919$	17.8	$42.3830 \pm 0.3825$	$40.8668 \pm 0.8174$
25.2	$64.5564 \pm 0.4211$	$68.3131 \pm 0.2923$	25.2	$64.7262 \pm 1.6562$	-

Tabelle 13: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag C

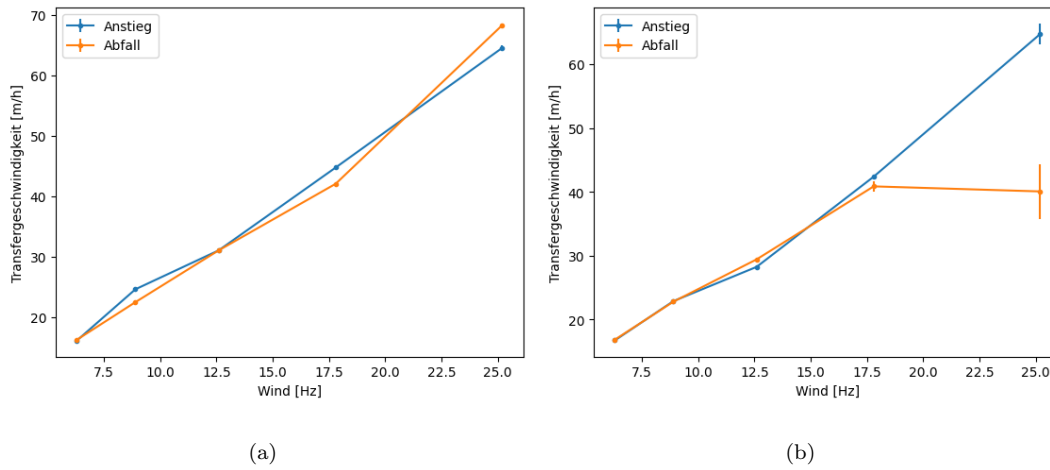


Abbildung 7.9: Transfargeschwindigkeiten aufgetragen gegen den Wind für Pyrazin für Messtag C

### 7.3 Mit Film

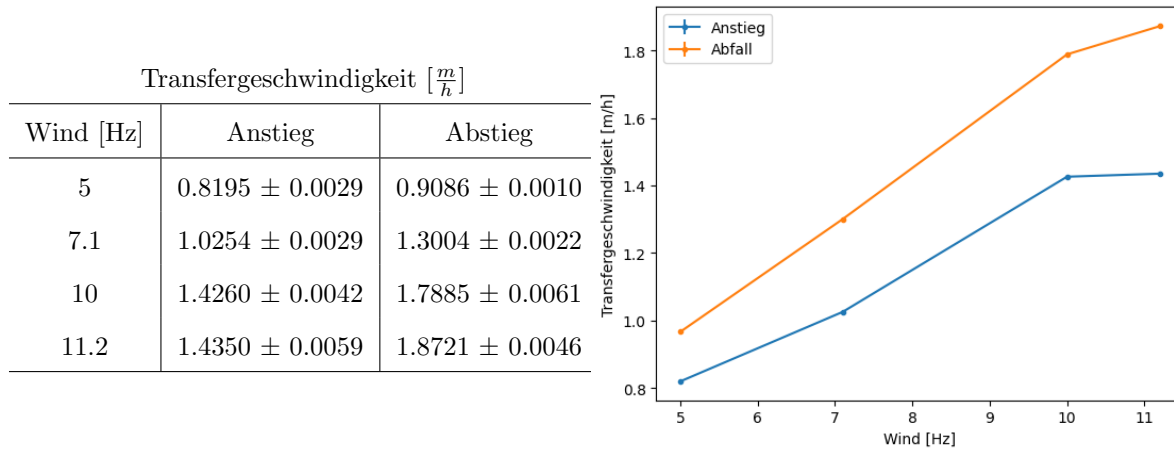


Abbildung 7.10: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Anisol für Messtag A mit Hexadecanolfilm

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5.6	$0.7130 \pm 0.0035$	$1.0373 \pm 0.0015$
7.9	$1.2717 \pm 0.0150$	$1.4944 \pm 0.0031$
12.6	$1.9745 \pm 0.0257$	$2.0731 \pm 0.0031$

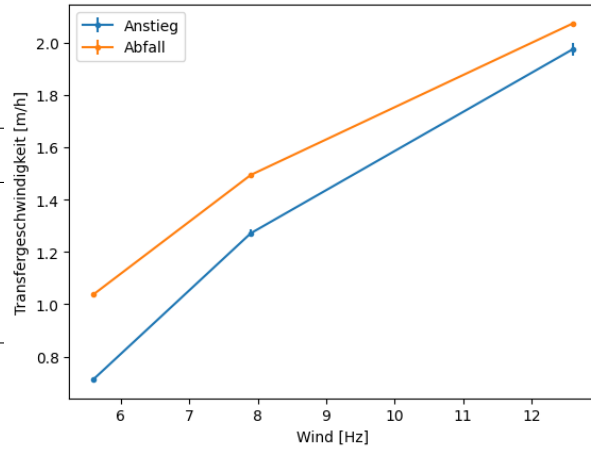


Abbildung 7.11: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Anisol für Messtag B mit Hexadecanolfilm

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
6.3	$0.9333 \pm 0.0080$	$1.1845 \pm 0.0013$
8.9	$1.3616 \pm 0.0191$	$1.6222 \pm 0.0027$
14.1	$2.5361 \pm 0.1259$	$2.1520 \pm 0.0036$

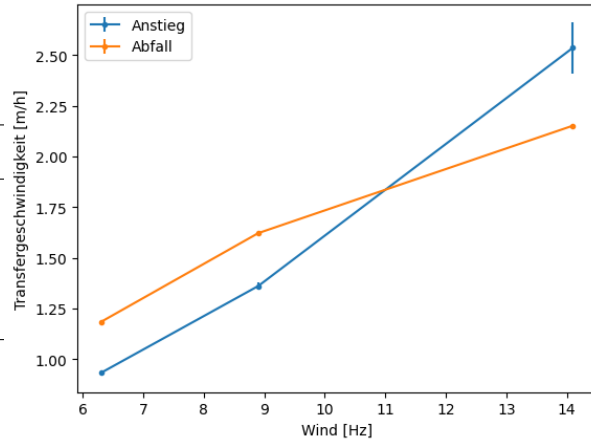


Abbildung 7.12: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Anisol für Messtag C mit Hexadecanolfilm

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
11.2	$1.7285 \pm 0.0076$	$2.1131 \pm 0.0043$
12.6	$1.9991 \pm 0.0077$	$2.3120 \pm 0.0066$
14.1	$2.0512 \pm 0.0114$	$2.3656 \pm 0.0064$
15.9	$5.0742 \pm 0.0142$	$5.0301 \pm 0.0237$

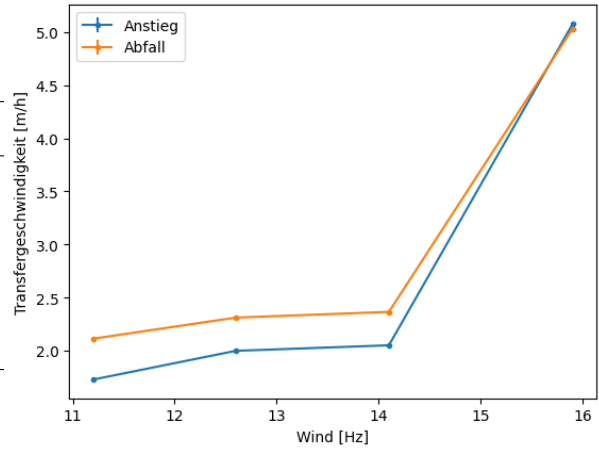


Abbildung 7.13: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Anisol für Messtag mit Olivenölfilm

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	$0.8314 \pm 0.0083$	$1.0230 \pm 0.0027$
7.1	$1.1678 \pm 0.0108$	$1.3864 \pm 0.0035$
10	$1.5058 \pm 0.0155$	$1.7059 \pm 0.0041$
14.1	$2.1331 \pm 0.0159$	$2.3189 \pm 0.0037$
20	$3.4805 \pm 0.0361$	$3.1302 \pm 0.0070$
28.3	$17.4812 \pm 0.2984$	-

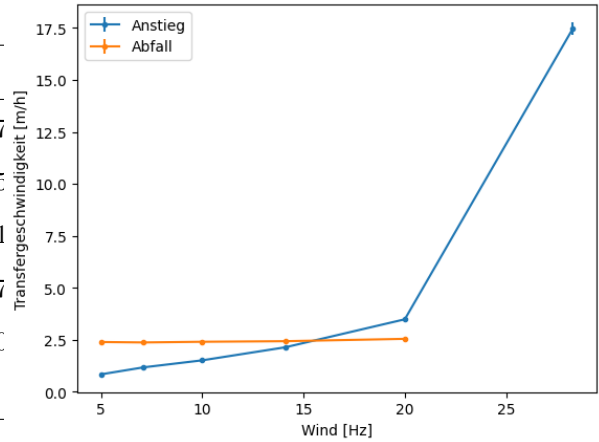


Abbildung 7.14: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Anisol für Messtag A mit Tergitol

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5.6	$0.9595 \pm 0.0096$	$1.0142 \pm 0.0031$
7.9	$1.4052 \pm 0.0087$	$1.4697 \pm 0.0041$
11.2	$1.6152 \pm 0.0156$	$1.8644 \pm 0.0042$
15.9	$2.5248 \pm 0.0180$	$2.4572 \pm 0.0057$
22.4	$3.3743 \pm 0.0396$	-

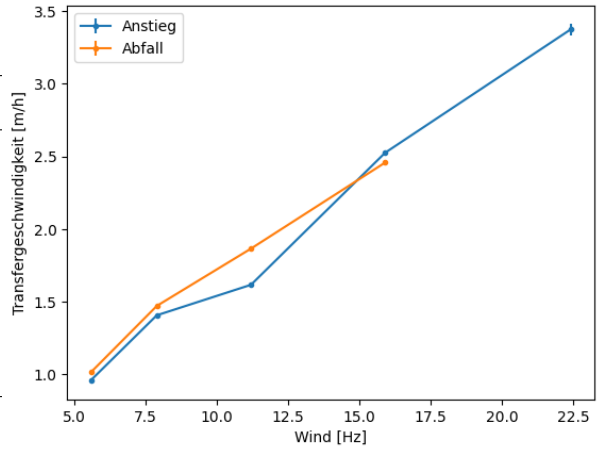


Abbildung 7.15: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Anisol für Messtag B mit Tergitol

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
6.3	$0.9349 \pm 0.0131$	$1.3210 \pm 0.0045$
8.9	$1.4676 \pm 0.0116$	$1.5176 \pm 0.0056$
12.6	$2.2012 \pm 0.0231$	$1.9387 \pm 0.0058$
17.8	$3.1392 \pm 0.0288$	$2.6281 \pm 0.0088$
25.2	$10.4141 \pm 0.0936$	$7.3195 \pm 0.0202$

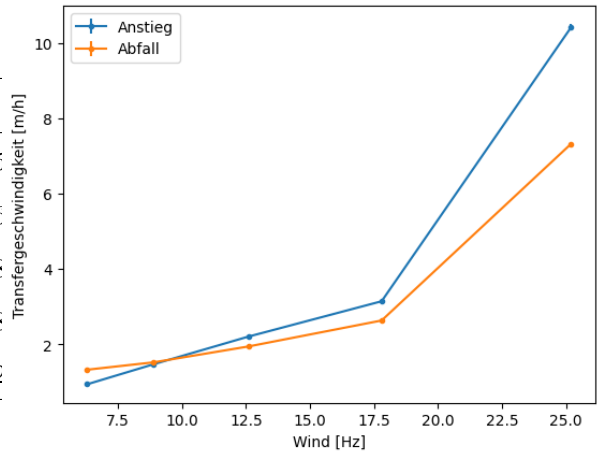


Abbildung 7.16: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Anisol für Messtag C mit Tergitol

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	$9.1822 \pm 0.0263$	$8.5054 \pm 0.002$
7.1	$13.4794 \pm 0.0778$	$13.6916 \pm 0.007$
10	$20.0182 \pm 0.0819$	$19.1117 \pm 0.017$
11.2	$23.2675 \pm 0.0937$	$21.0619 \pm 0.017$

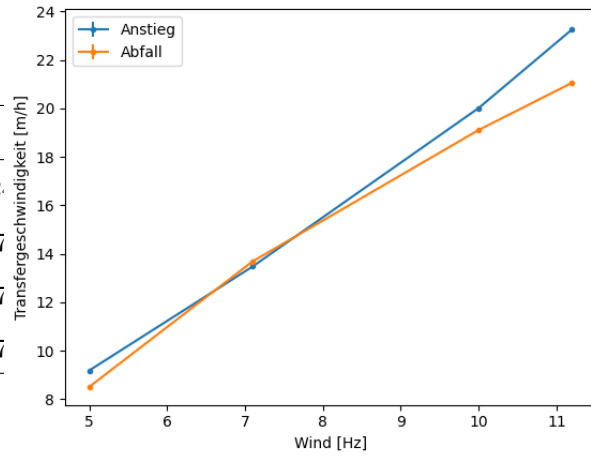


Abbildung 7.17: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag A mit Hexadecanolfilm

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5.6	$11.6709 \pm 0.0347$	$9.3045 \pm 0.006$
7.9	$16.9427 \pm 0.0842$	$15.3253 \pm 0.047$
12.6	$23.7941 \pm 0.1277$	$23.1745 \pm 0.375$

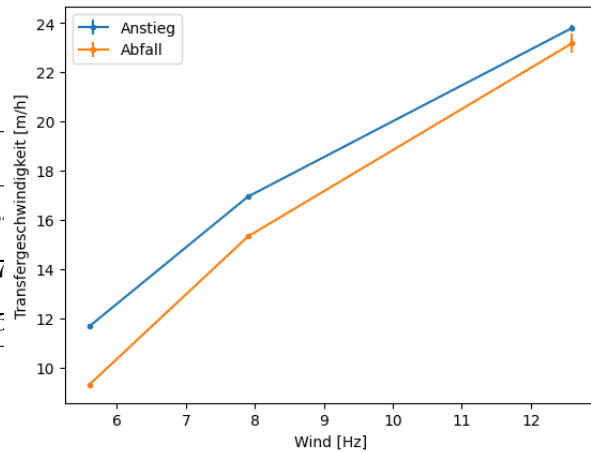


Abbildung 7.18: Transfargeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag B mit Hexadecanolfilm

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
6.3	$12.8479 \pm 0.0527$	$11.7197 \pm 0.007$
8.9	$17.2615 \pm 0.0835$	$17.1435 \pm 0.014$
14.1	$27.6556 \pm 0.1296$	$27.1094 \pm 0.189$

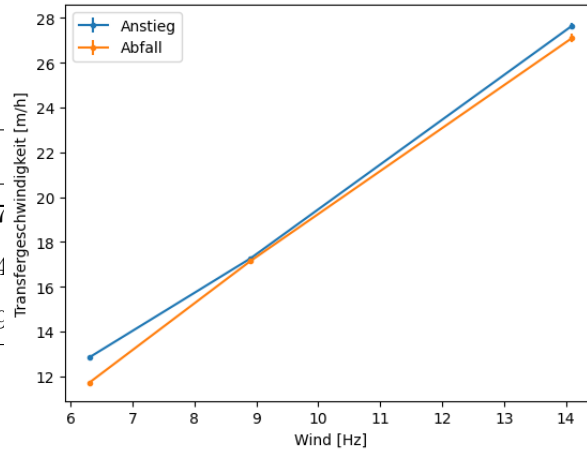


Abbildung 7.19: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag C mit Hexadecanolfilm

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
11.2	$21.0408 \pm 0.1173$	$22.5240 \pm 0.014$
12.6	$23.5934 \pm 0.1111$	$24.3876 \pm 0.015$
14.1	$27.6890 \pm 0.1270$	$26.8543 \pm 0.022$
15.9	$33.1141 \pm 0.6052$	$35.7934 \pm 0.157$

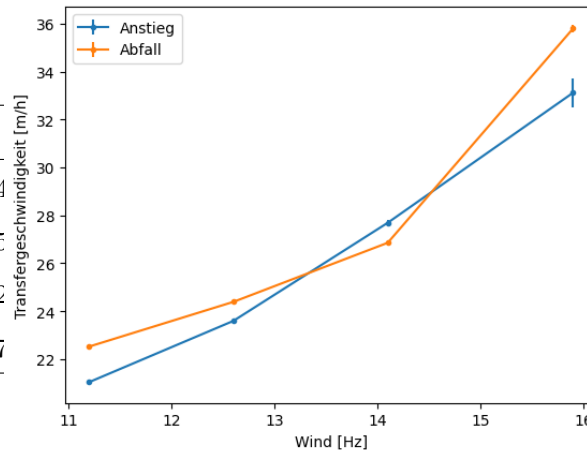


Abbildung 7.20: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag mit Olivenölfilm

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	-	$9.7482 \pm 0.003$
7.1	$17.1144 \pm 0.0818$	$13.7166 \pm 0.006$
10	$22.3069 \pm 0.0905$	$18.6000 \pm 0.009$
14.1	$29.8397 \pm 0.1284$	$24.8254 \pm 0.021$
20	$36.9622 \pm 0.3894$	$35.9328 \pm 0.096$
28.3	$48.3352 \pm 0.5885$	-

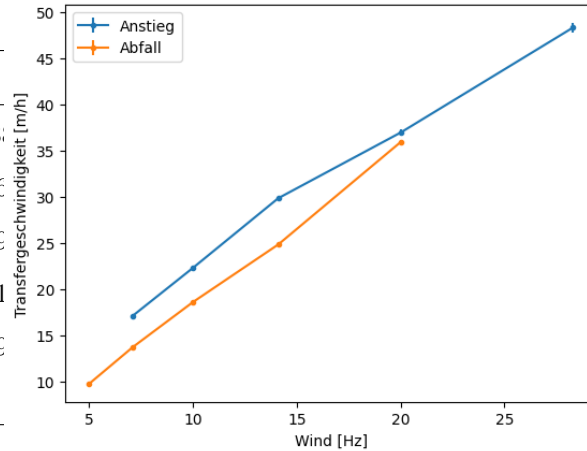


Abbildung 7.21: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag A mit Tergitol

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5.6	$12.7528 \pm 0.0447$	$10.7763 \pm 0.009$
7.9	$16.4473 \pm 0.0670$	$15.2477 \pm 0.006$
11.2	$21.2653 \pm 0.0893$	$21.1334 \pm 0.011$
15.9	$28.3950 \pm 0.1432$	$28.4537 \pm 0.040$
22.4	$42.6660 \pm 0.2766$	-

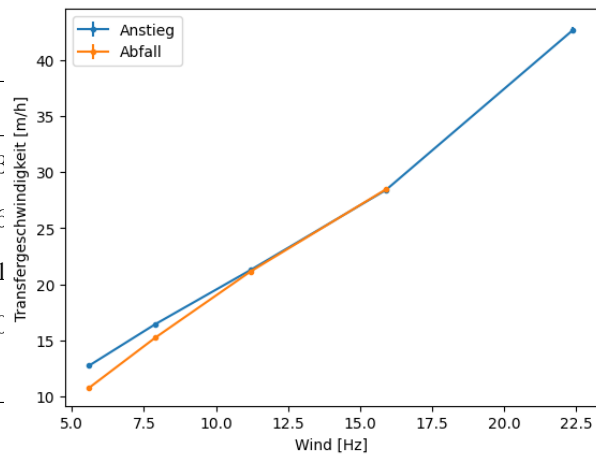


Abbildung 7.22: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag B mit Tergitol



Transfargeswindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
6.3	14.5041 ± 0.0555	12.3597 ± 0.008
8.9	17.1514 ± 0.0657	17.1633 ± 0.007
12.6	24.2514 ± 0.0973	23.3303 ± 0.014
17.8	33.3496 ± 0.1571	31.7626 ± 0.066
25.2	50.0105 ± 0.4052	53.3790 ± 1.067

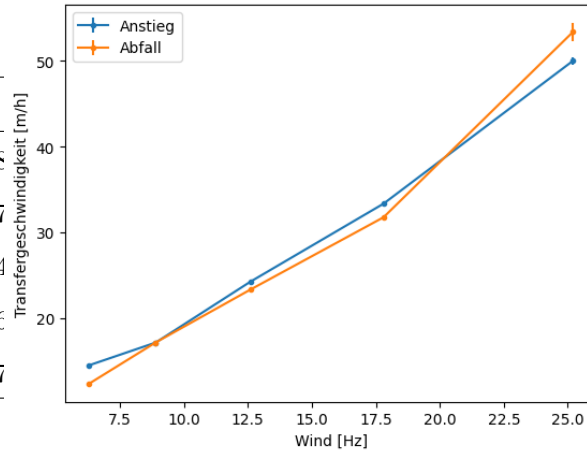


Abbildung 7.23: Transfargeswindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag C mit Tergitol

Transfargeswindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	14.1488 ± 0.0623	12.4886 ± 0.005
7.1	17.6261 ± 0.0588	17.3269 ± 0.015
10	25.5968 ± 0.0856	23.8473 ± 0.077
14.1	35.0362 ± 0.1746	36.0892 ± 0.030

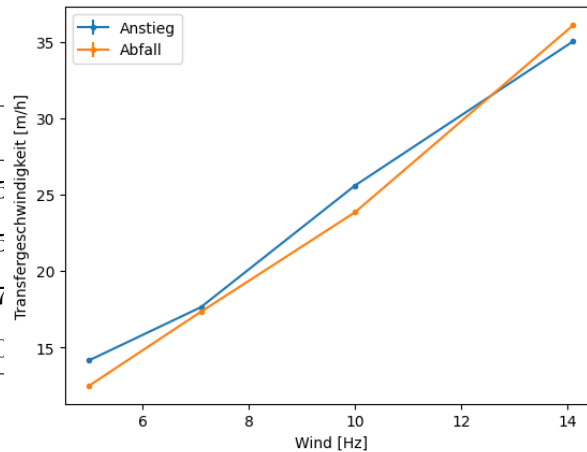


Abbildung 7.24: Transfargeswindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag A mit Meereis-Modell (100 Schollen)

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	14.4775 ± 0.0469	10.5049 ± 0.003
7.1	16.7915 ± 0.0517	14.4789 ± 0.005
10	23.5782 ± 0.0741	20.7471 ± 0.013
14.1	28.9839 ± 0.1171	28.3373 ± 0.051
20	41.9819 ± 0.2584	45.6356 ± 0.108
28.3	56.2564 ± 0.4720	58.5864 ± 1.104

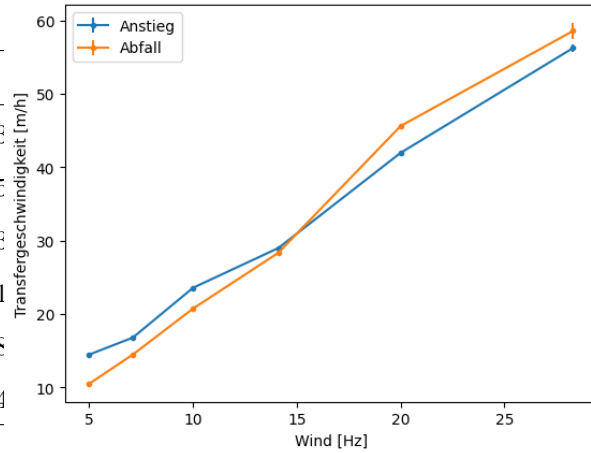


Abbildung 7.25: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag A mit Meereis-Modell (700 Schollen)

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	13.3124 ± 0.0360	9.0703 ± 0.002
7.1	15.8930 ± 0.0438	12.1472 ± 0.005
10	18.5051 ± 0.0701	16.3311 ± 0.012
14.1	26.9723 ± 0.1027	24.6341 ± 0.013
20	36.5807 ± 0.1789	35.6886 ± 0.055
28.3	46.0432 ± 0.3736	45.1106 ± 0.418

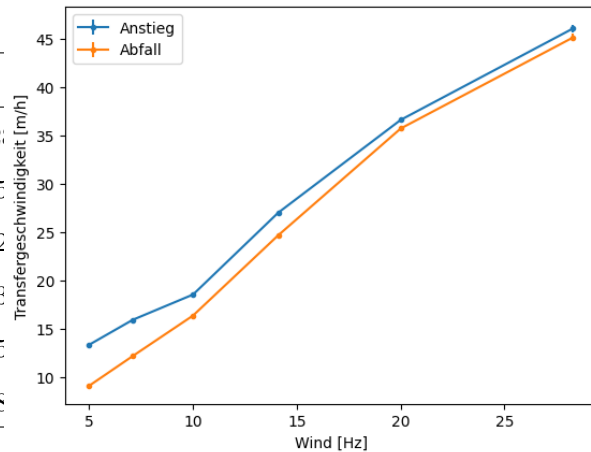


Abbildung 7.26: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von Pyrazin für Messtag A mit Meereis-Modell (1705 Schollen)

Transfargeswindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	$11.7145 \pm 0.0191$	$8.4880 \pm 0.004$
7.1	$14.0458 \pm 0.0084$	$12.4665 \pm 0.005$
10	$20.7661 \pm 0.0139$	$16.7124 \pm 0.011$
11.2	$22.7658 \pm 0.0170$	$19.0527 \pm 0.033$

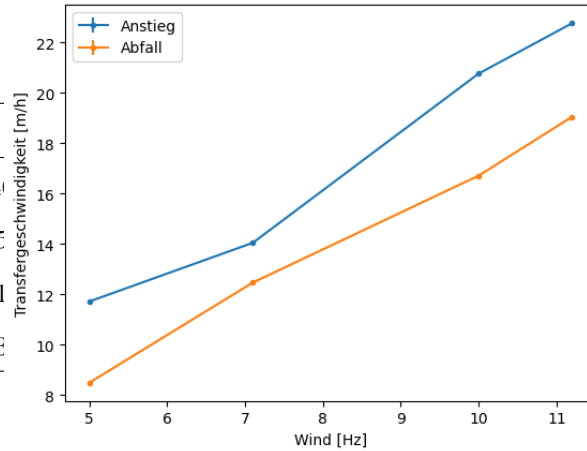


Abbildung 7.27: Transfargeswindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag A mit Hexadecanolfilm

Transfargeswindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5.6	$15.8786 \pm 0.0308$	$9.3048 \pm 0.004$
7.9	$16.6011 \pm 0.0541$	$14.1186 \pm 0.047$
12.6	$28.5193 \pm 0.1716$	$20.5757 \pm 0.391$

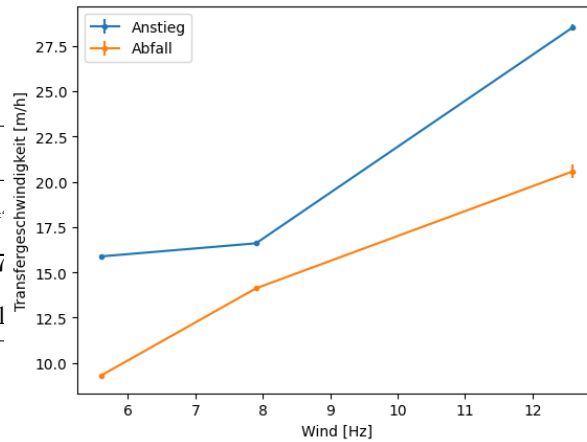


Abbildung 7.28: Transfargeswindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag B mit Hexadecanolfilm

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
6.3	$15.5528 \pm 0.0120$	$11.0157 \pm 0.004$
8.9	$19.4912 \pm 0.0643$	$15.8583 \pm 0.064$
14.1	$26.4978 \pm 0.1249$	$24.5514 \pm 0.171$

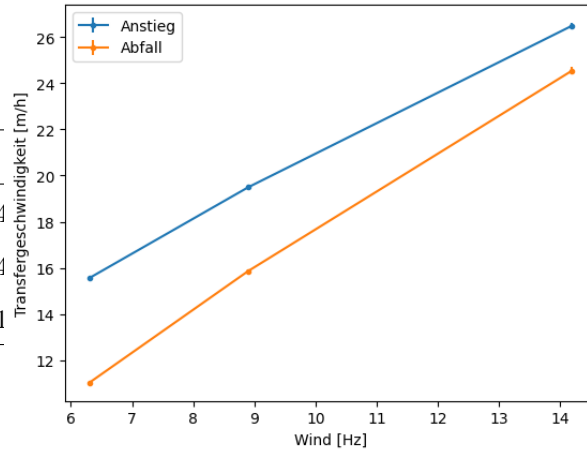


Abbildung 7.29: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag C mit Hexadecanolfilm

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
11.2	$18.3978 \pm 0.0797$	$19.4983 \pm 0.043$
12.6	$21.7154 \pm 0.7929$	$20.9402 \pm 0.515$
14.1	$25.2301 \pm 0.0919$	$24.6679 \pm 0.065$
15.9	$30.4977 \pm 0.3978$	$31.8645 \pm 0.272$

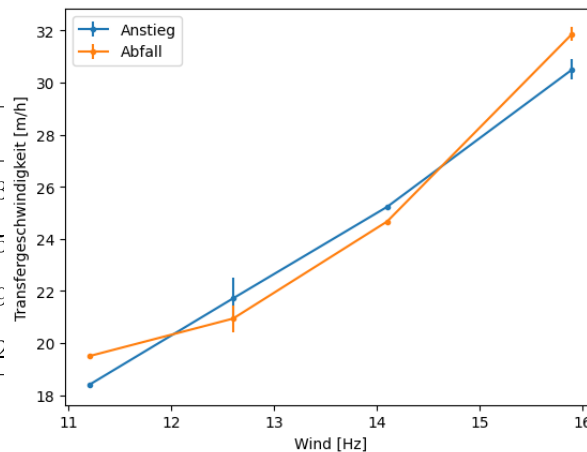


Abbildung 7.30: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag mit Olivenölfilm

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	Anstieg	Abstieg
5	13.1840 ± 0.8254	9.2015 ± 0.0041
7.1	13.5178 ± 0.0647	12.3758 ± 0.0111
10	15.7723 ± 0.2653	16.2903 ± 0.0261
14.1	24.9482 ± 1.8498	24.1106 ± 0.5301
20	-	-
28.3	-	-

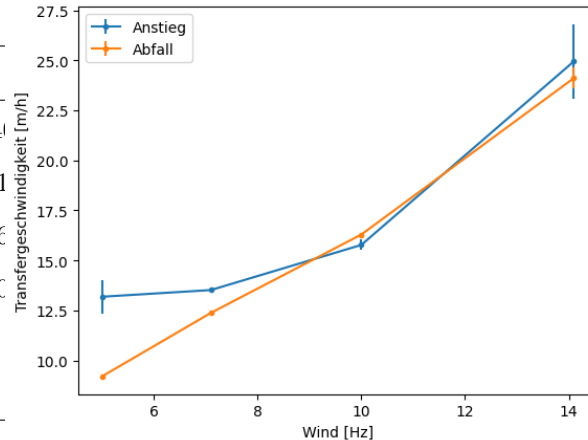


Abbildung 7.31: Transfergeschwindigkeiten aus Anstieg und Abstieg von 2,5-Dimethylpyrazin für Messtag A mit Tergitol

## 7.4 Vergleich mit und ohne Film

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
5	13.3456 ± 0.0500	8.8438 ± 0.0264
5.6	13.8728 ± 0.0870	10.4877 ± 0.0353
6.3	16.5175 ± 0.0932	12.2838 ± 0.0533
7.1	17.9506 ± 0.0552	13.5855 ± 0.0781
7.9	20.085 ± 0.1084	16.1340 ± 0.0965
8.9	23.2135 ± 0.1679	17.2025 ± 0.0847
10	23.6963 ± 0.1253	19.5650 ± 0.0838
11.2	27.9141 ± 0.1934	22.1647 ± 0.0953
12.6	27.9389 ± 0.2208	23.4843 ± 0.3967
14.1	34.4227 ± 0.2142	27.3825 ± 0.2293

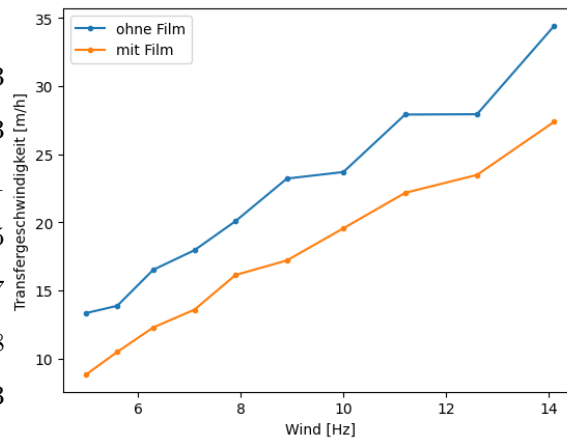


Abbildung 7.32: Vergleich der Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Hexadecanolfilm für Pyrazin

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]

Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
5	12.0139 ± 0.0167	10.1013 ± 0.0197
5.6	13.8873 ± 0.0427	12.5917 ± 0.0311
6.3	15.6676 ± 0.0571	13.2843 ± 0.0129
7.1	16.762 ± 0.0301	13.2562 ± 0.0102
7.9	19.5104 ± 0.0670	15.3599 ± 0.0721
8.9	21.8675 ± 0.1001	17.6748 ± 0.0909
10	21.6772 ± 0.0549	18.7393 ± 0.0178
11.2	26.3165 ± 0.1230	20.9093 ± 0.1733
12.6	28.5286 ± 0.1602	24.5475 ± 0.4277
14.1	31.6454 ± 0.5426	25.5246 ± 0.2119

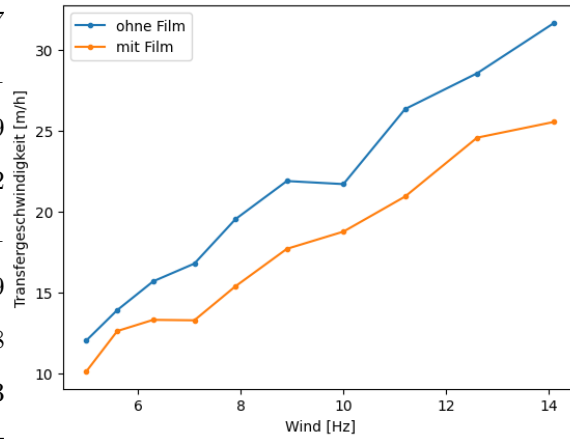


Abbildung 7.33: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Hexadecanolfilm für 2,5-Dimethylpyrazin

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]

Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
5	1.5098 ± 0.0083	0.8641 ± 0.0031
5.6	2.0255 ± 0.0130	0.8752 ± 0.0038
6.3	2.2161 ± 0.0485	1.0589 ± 0.0081
7.1	2.4471 ± 0.0105	1.1629 ± 0.0036
7.9	2.7481 ± 0.0144	1.3831 ± 0.0153
8.9	3.7172 ± 0.0961	1.4919 ± 0.0193
10	3.7835 ± 0.0181	1.6073 ± 0.0074
11.2	4.7805 ± 0.0354	1.6536 ± 0.0075
12.6	5.9972 ± 0.0584	2.0238 ± 0.0259
14.1	7.3959 ± 0.0329	2.3441 ± 0.1260

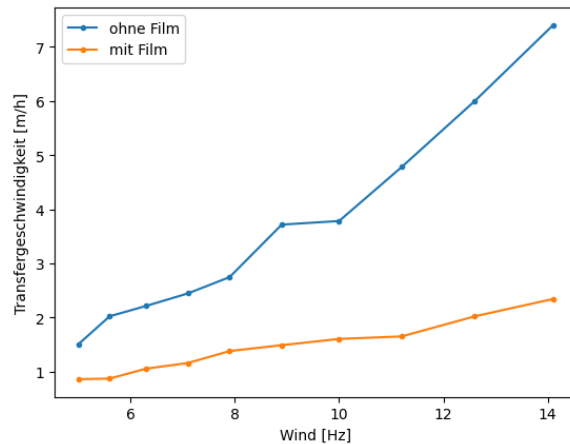


Abbildung 7.34: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Hexadecanolfilm für Anisol

Transfargeswindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
11.2	27.9141 ± 0.1934	21.7824 ± 0.1182
12.6	27.9389 ± 0.2208	23.9905 ± 0.1122
14.1	34.4227 ± 0.2142	27.2717 ± 0.1230
15.9	37.9156 ± 0.5206	34.4538 ± 0.6254

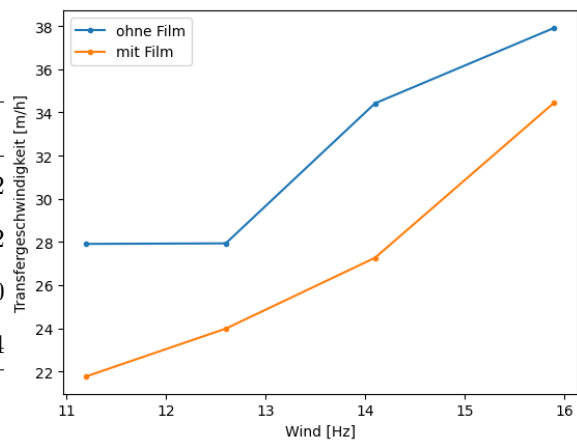


Abbildung 7.35: Vergleich der Transfargeswindigkeiten mit und ohne Olivenölfilm für Pyrazin

Transfargeswindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
11.2	26.3165 ± 0.1300	18.9481 ± 0.0909
12.6	28.5286 ± 0.1602	21.3278 ± 0.9459
14.1	31.6454 ± 0.5426	24.949 ± 0.1150
15.9	39.5784 ± 1.1417	31.1811 ± 0.4823

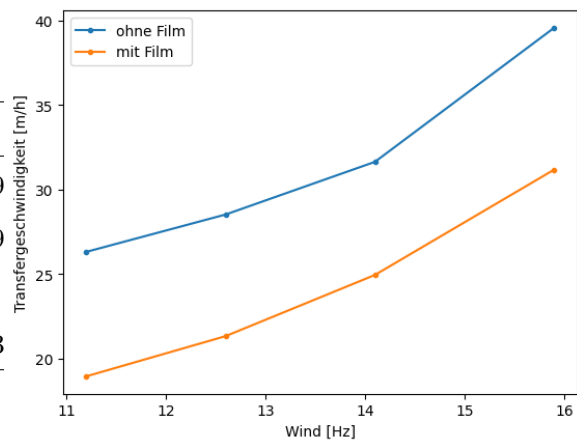


Abbildung 7.36: Vergleich der Transfargeswindigkeiten mit und ohne Olivenölfilm für 2,5-Dimethylpyrazin

Transfargeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
11.2	4.7805 ± 0.0354	1.9208 ± 0.0087
12.6	5.9972 ± 0.0584	2.1556 ± 0.0101
14.1	7.3959 ± 0.0328	2.2084 ± 0.0131
15.9	9.9602 ± 0.1447	5.0522 ± 0.0354

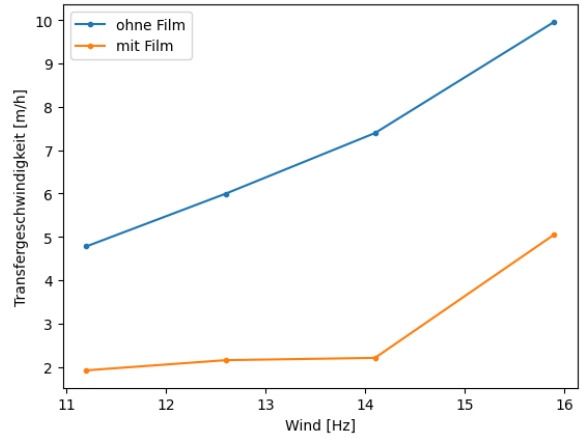


Abbildung 7.37: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Olivenölfilm für Anisol



Transfargeswindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
5	13.3456 ± 0.0500	9.7482 ± 0.0038
5.6	13.8728 ± 0.0870	11.7646 ± 0.0449
6.3	16.5175 ± 0.0932	13.4319 ± 0.0561
7.1	17.9506 ± 0.0552	15.4155 ± 0.0821
7.9	20.0850 ± 0.1084	15.8475 ± 0.0673
8.9	23.2135 ± 0.1679	17.1574 ± 0.0661
10	23.6963 ± 0.1253	20.4535 ± 0.0910
11.2	27.9141 ± 0.1934	21.1994 ± 0.0900
12.6	27.9389 ± 0.2208	23.7909 ± 0.0984
14.1	34.4227 ± 0.2142	27.3326 ± 0.1300
15.9	37.9156 ± 0.5206	28.4244 ± 0.1488
17.8	42.5277 ± 0.9565	32.5561 ± 1.5710
20	51.3500 ± 0.4914	36.4475 ± 0.4019
22.4	60.4633 ± 1.5310	42.666 ± 0.2766
25.2	65.8652 ± 1.7337	51.6948 ± 1.1414
28.3	76.2075 ± 0.9115	48.3352 ± 0.5885

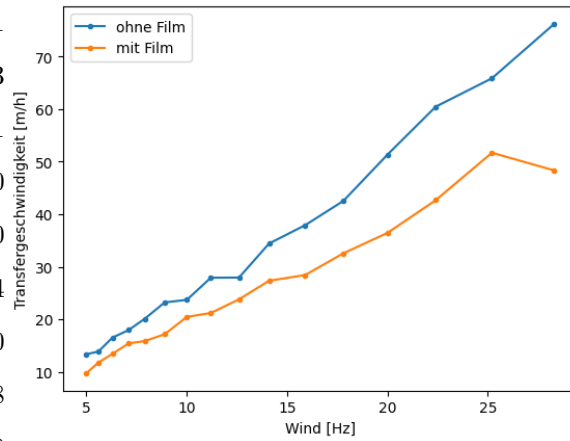


Abbildung 7.38: Vergleich der Transfargeschwindigkeiten mit und ohne Tergitolfilm für Pyrazin

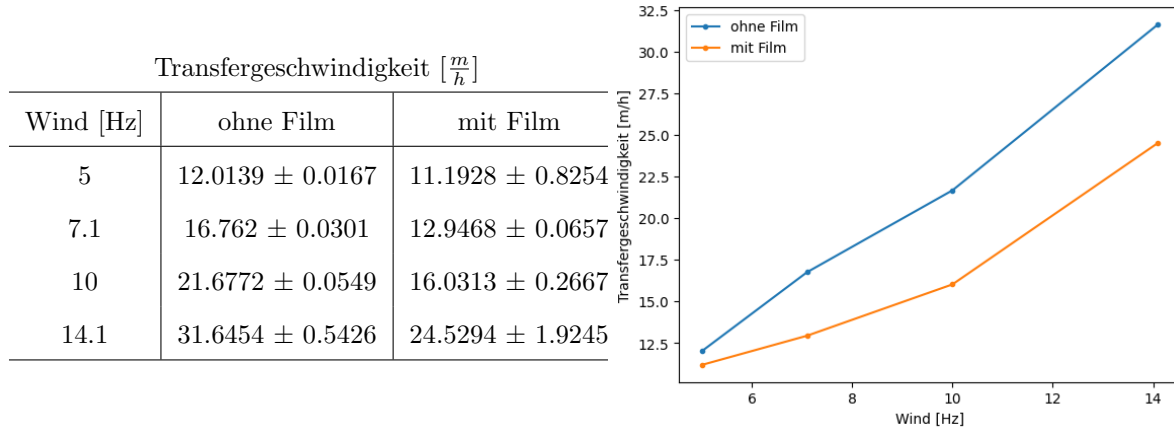


Abbildung 7.39: Vergleich der Transfargeswindigkeiten mit und ohne Tergitolfilm für 2,5-Dimethylpyrazin

Transfervgeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
5	1.5098 ± 0.0500	0.9272 ± 0.0087
5.6	2.0255 ± 0.0870	0.9867 ± 0.0101
6.3	2.2161 ± 0.0932	1.128 ± 0.0139
7.1	2.4471 ± 0.0552	1.2771 ± 0.0114
7.9	2.7481 ± 0.1084	1.4375 ± 0.0096
8.9	3.7172 ± 0.1679	1.4926 ± 0.0129
10	3.7835 ± 0.1253	1.6059 ± 0.0160
11.2	4.7805 ± 0.1034	1.7398 ± 0.0162
12.6	5.9972 ± 0.2208	2.07 ± 0.0238
14.1	7.3959 ± 0.2142	2.226 ± 0.0163
15.9	9.9602 ± 0.5206	2.491 ± 0.0189
17.8	11.9366 ± 0.2823	2.8837 ± 0.0301
20	13.7306 ± 0.1482	3.3054 ± 0.0368
22.4	16.7645 ± 0.6781	3.3743 ± 0.0396
25.2	22.5929 ± 2.5703	8.8668 ± 0.0958
28.3	21.4112 ± 0.6300	17.4812 ± 0.2984

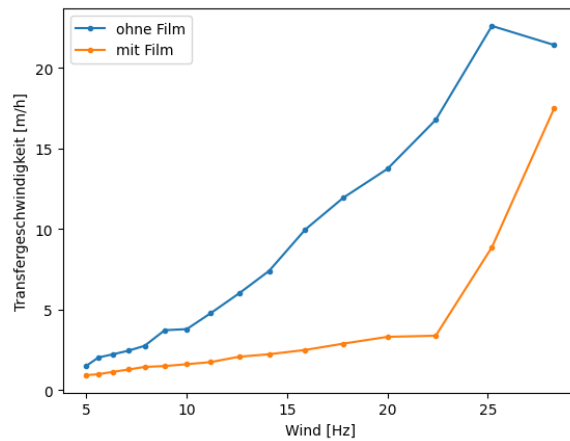


Abbildung 7.40: Vergleich der Transfervgeschwindigkeiten mit und ohne Tergitolfilm für Anisol

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
5	13.3456 ± 0.0500	13.3187 ± 0.0626
7.1	17.9506 ± 0.0552	17.4765 ± 0.0608
10	23.6963 ± 0.1253	24.7221 ± 0.1157
14.1	34.4227 ± 0.2142	35.5627 ± 0.1773

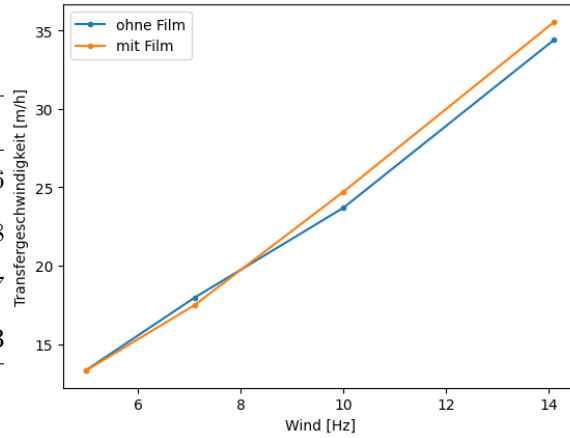


Abbildung 7.41: Vergleich der Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell bei 100 Schollen

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
5	13.3456 ± 0.0500	12.4912 ± 0.0470
7.1	17.9506 ± 0.0552	15.6352 ± 0.0520
10	23.6963 ± 0.1253	22.1627 ± 0.0753
14.1	34.4227 ± 0.2142	28.6606 ± 0.1280
20	51.350 ± 0.4914	43.8088 ± 0.2804
28.3	76.2075 ± 0.9115	57.4214 ± 1.2015

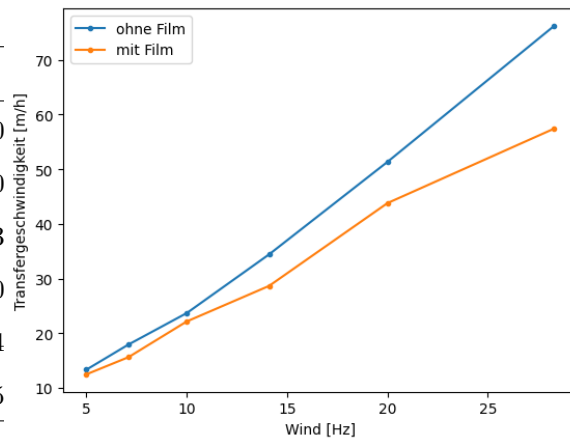


Abbildung 7.42: Vergleich der Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell bei 700 Schollen

Transfergeschwindigkeit [ $\frac{m}{h}$ ]		
Wind [Hz]	ohne Film	mit Film
5	13.3456 ± 0.0500	11.1914 ± 0.0361
7.1	17.9506 ± 0.0552	14.0201 ± 0.0441
10	23.6963 ± 0.1253	17.4181 ± 0.0713
14.1	34.4227 ± 0.2142	25.8032 ± 0.1036
20	51.350 ± 0.4914	36.1347 ± 0.1873
28.3	76.2075 ± 0.9115	45.5769 ± 0.5612

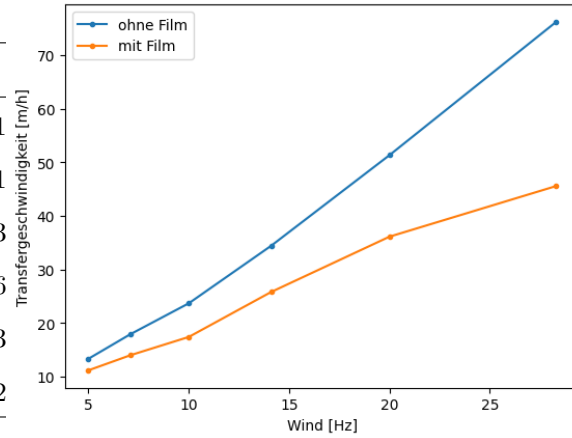


Abbildung 7.43: Vergleich der Transfergeschwindigkeiten mit und ohne Meereis-Modell bei 1705 Schollen

## Literatur

- [AL54] Robert J. Archer & Victor K. LaMer. “The effect of monolayers on the rate of evaporation of water”. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 58.6 (1954), S. 807–829. DOI: [10.1111/j.1749-6632.1954.tb45873.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1954.tb45873.x).
- [Arb] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. URL: <https://gestis.dguv.de/data?name=024650>.
- [Dea77] E. Deacon. “Gas Transfer to and across an air water interface”. In: *Tellus* 29 (März 1977), S. 363–374. DOI: [10.1111/j.2153-3490.1977.tb00746.x](https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1977.tb00746.x).
- [Fre+95] Nelson Frew et al. “Variation of air-water gas transfer with wind stress and surface viscoelasticity”. In: AEON, Dez. 1995, S. 529–541. ISBN: 3-9804429-0-X. DOI: [10.5281/zenodo.10405](https://doi.org/10.5281/zenodo.10405).
- [Fri20] Sonja Friman. “Laboratory investigations of concentration and wind profiles close to the wind-driven wavy water surface”. Diss. Universität Heidelberg, 2020. DOI: <https://doi.org/10.11588/heidok.00028310>.
- [Hay16] William M. Haynes. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315380476>.
- [Jäh+89] Bernd Jähne et al. “Investigating the transfer processes across the free aqueous viscous boundary layer by the controlled flux method”. In: *Tellus B* 41 (Apr. 1989). DOI: [10.3402/tellusb.v41i2.15068](https://doi.org/10.3402/tellusb.v41i2.15068).
- [Jäh19] Bernd Jähne. “Air-Sea Gas Exchange”. In: *Encyclopedia of Ocean Sciences (Third Edition)*. Hrsg. von J. Kirk Cochran, Henry J. Bokuniewicz & Patricia L. Yager. Third Edition. Oxford: Academic Press, 2019, S. 1–13. ISBN: 978-0-12-813082-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11613-6>.
- [JK22] Bernd Jähne & Kerstin Krall. “On the limitations of current field measuring techniques and measurements for air-sea gas exchange”. In: *8th International Symposium on Gas Transfer at Water surface*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6772400>.
- [Kam24] Dietmar Kammerer. “Olivenöl”. In: *RÖMPP [Online], Stuttgart, Georg Thieme Verlag* (2024). URL: <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-15-00555>.
- [KJ] Kerstin Krall & Bernd Jähne. “Annular Wind-Wave Tanks”.

- [KJ18] Jakob Kunz & Bernd Jähne. “Investigating Small-Scale Air–Sea Exchange Processes via Thermography”. In: *Frontiers in Mechanical Engineering* 4 (März 2018). DOI: 10.3389/fmech.2018.00004.
- [KKr+22] K.Krall et al. “Sufficiently Realistic Simulation of Oceanic Conditions for Air-Sea Gas Exchange at the Re-Engineered Heidelberg Aeolotron”. In: *8th International Symposium on Gs Transfer at Water surface*. 2022. URL: <https://zenodo.org/records/6770055>.
- [Krä11] Christine Kräuter. “Aufteilung des Transferwiderstands zwischen Luft und Wasser beim Austausch flüchtiger Substanzen mittlerer Löslichkeit zwischen Ozean und Atmosphäre”. Diplomarbeit. Institut für Umweltphysik (IUP), 2011. DOI: <https://doi.org/10.11588/heidok.00013010>.
- [Kra13] Kerstin Krall. “Laboratory Investigations of Air-Sea Gas Transfer under a Wide Range of Water Surface Conditions”. Diss. Institut für Umweltphysik Heidelberg, Jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.11588/heidok.00014392>.
- [Küh22] Pernilla Kühn. “Evaluierung von Tracern für schnelle Gasaustauschmessungen im Aeolotron mittels UV-Absorptionsspektroskopie”. Bachelorarbeit. Institut für Umweltphysik Heidelberg, 2022.
- [La 62] Victor K. La Mer, Hrsg. *Retardation of Evaporation by Monolayers: Transport Processes*. Elsevier, 1962. ISBN: 9781483272962. URL: <https://www.elsevier.com/books/retardation-of-evaporation-by-monolayers/la-mer/978-1-4832-2947-8>.
- [Mes+15] Evridiki Mesarchaki et al. “Measuring air–sea gas-exchange velocities in a large-scale annular wind–wave tank”. In: *Ocean Science (OS)* 11 (Jan. 2015). DOI: 10.5194/os-11-121-2015.
- [MF75] K.O. Münnich & D. Flothmann. “Gas exchange in relation to other air/sea interaction phenomena”. In: *SCOR Workshop on "Air/Sea Transport of Pollutants", Miami*. 1975. DOI: 10.5281/zenodo.13345.
- [MM85] Laurent Memery & Liliane Merlivat. “Influence of gas transfer on the CO<sub>2</sub> uptake by the ocean”. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 90.C4 (1985), S. 7361–7366. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC090iC04p07361>.
- [Pfa44] Harry F. Pfann. “Pyrazine—Water Azeotrope”. In: *J. Am. Chem. Soc.* 1944, 66, 1, 155 (1944). DOI: <https://doi.org/10.1021/ja01229a503>.

- [San15] Rolf Sander. “Compilation of Henry’s law constants (Version 4.0) for water as solvent”. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 15 (Apr. 2015), S. 4399–4981. DOI: [10.5194/acp-15-4399-2015](https://doi.org/10.5194/acp-15-4399-2015).
- [Sta10] Julian Stapf. “Bestimmung der dynamischen Oberflächenspannung mit Hilfe der Blasendruckmethode”. Diplomarbeit. Institut für Umweltphysik, Fakultät für Physik und Astronomie, Univ. Heidelberg, 2010. DOI: <https://doi.org/10.11588/heidok.00017777>.
- [Ver+12] Sergey Verevkin et al. “Rediscovering the Wheel. Thermochemical Analysis of Energetics of the Aromatic Diazines”. In: *The Journal of Physical Chemistry Letters* 3 (Nov. 2012), S. 3454–3459. DOI: [10.1021/jz301524c](https://doi.org/10.1021/jz301524c).
- [Vog06] Felix Vogel. “Spectroscopic Techniques for Gas-Exchange Measurements”. Diplomarbeit. Institut für Umweltphysik Heidelberg, Nov. 2006. URL: [https://www.researchgate.net/publication/255704120\\_Spectroscopic\\_Techniques\\_for\\_Gas-Exchange\\_Measurements](https://www.researchgate.net/publication/255704120_Spectroscopic_Techniques_for_Gas-Exchange_Measurements).
- [Voi19] Phillip Voigt. “Simulation and Measurement of the Water-sided Viscous Shear Stress without Waves”. Bachelorarbeit. Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11588/heidok.00026653>.
- [Woo+19] D.K. Woolf et al. “Key Uncertainties in the Recent Air-Sea Flux of CO<sub>2</sub>”. In: *Global Biogeochemical Cycles* 33.12 (2019), S. 1548–1563. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GB006041>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2018GB006041>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018GB006041>.
- [Yaw95] Carl Yaws. *Handbook of transport property data : viscosity, thermal conductivity, and diffusion coefficients of liquids and gases*. Gulf Pub. Co., Houston, Tex., 1995.



## 8 Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den