

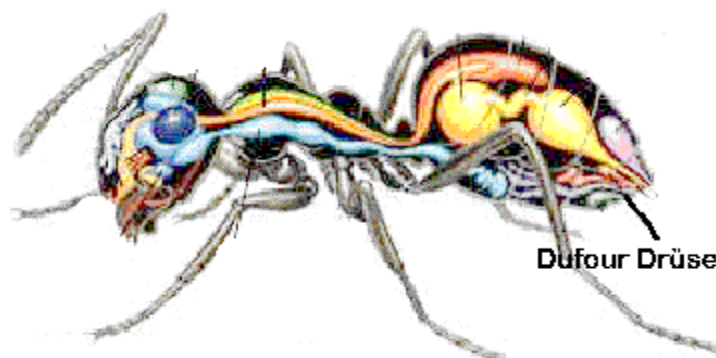
Viele soziale Arten, wie die Ameisen, benutzen zur Kommunikation arteigene chemische Duftstoffe (*Pheromone*). Man unterscheidet Alarm-, Geschlechts- und Spurpheromone. Alarmpheromone lösen spezifische Angriffs- oder Fluchtreaktionen aus, Geschlechtspheromone synchronisieren die gemeinsame Paarung vieler geschlechtsreifer Tiere. Die Spurpheromone dienen zur Markierung von Pfaden zu Futterquellen. Sie sind im allgemeinen weniger flüchtig als Alarm- oder Geschlechtspheromone. Nicht nur die Art, sondern auch die Menge eines Pheromons bedeutet eine bestimmte Information. So verwenden die Blattschneiderameisen (*atta*) ein Alarmpheromon, das in niedriger Konzentration lockend wirkt, in höherer Konzentration (10 fach)

dagegen Fluchtreaktionen auslöst. Die Ameisen der Gattung *oecophylla* (Weberameisen) bilden als Alarmpheromon ca. 30 Inhaltsstoffe in vier Drüsen. Im Folgenden sind nur die Spurpheromone angesprochen.

Einfluss der Umgebungstemperatur¹

Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Aktivität von Roten Ameisen (*Solenopsis*, *Myrmicinae*) kann einfach erfasst werden. Als wechselwarme Tiere ist ihr Verhalten durch die Umgebungstemperatur, wegen der Stoffwechsel Geschwindigkeit, wesentlich beeinflusst. Um diese Aktivität messbar beurteilen zu können wurde die Geschwindigkeit von verschiedenen Tieren zum Nest (*towards nest*, TN) und vom Nest weg (*away from the nest*, AN) gemessen. Zwei Marken in 30 cm Distanz dienten als Grenzen. Die Geschwindigkeiten verstehen sich als Mittelwert einer Gruppe von 16 Ameisen. Damit wurden die individuellen Unterschiede von grösseren, schnelleren und kleineren, langsameren Ameisen einigermaßen ausgeglichen. Die Umgebungstemperatur zwischen Februar und Juni variierte in Argentinien (Nähe Rosario) von 9°C bis 33°C.

Pheromone²



Die Ameisen folgten einer Spur, die durch Pheromone gelegt war. Diese Pheromone werden in kleinsten Mengen aus der Dufour Drüse ausgeschieden und bestehen aus einem Kohlenwasserstoff, genauer einem Sesquiterpen

1

„Ant Activity Associated with a Chemical Compound, *Journal of Chemical Education*, Vol. 77, No. 2 February 2000, 181-183

² Pheromone (von griech.: pherein = tragen u. hormon = antreibend). Unter dem 1959 von Karlson und Lüscher anstelle des früheren Namens Ektohormone eingeführten Begriff versteht man schon in äusserst geringen Konzentrationen wirksame Stoffe, die der chemischen Verständigung von Organismen einer Art dienen (im Gegensatz zu Allomonen).

mit 4 Doppelbindungen ($C_{15}H_{24}$). Die Spur wird durch die Dufour- Drüse direkt auf den Boden ausgestossen. Die Arbeiter folgen dieser Pheromon Spur zu Nahrungsquellen oder einem neuen Nest. Entsprechend den Eigenschaften der Substanz ist diese Spur sehr flüchtig. Die Konzentration nimmt etwa innerhalb von ungefähr 2 Minuten bis unterhalb der Wirkungsgrenze ab. Bei einer Geschwindigkeit zwischen 0,35 bis 2,2 cm pro Sekunde ist die wirksame Spurlänge zwischen 85 bis 260 cm. Daher müssen Arbeiter auf dem Weg von und zu der Nahrung die Spur durch Sekretion erneuern. Das geschieht nur auf dem Weg von der Nahrung zum Nest, wenn auch wirklich Nahrung gefunden wurde. Je mehr Nahrung gefunden wird, desto mehr Arbeiter sind auf der Spur und erneuern diese. Die hohe Konzentration zieht noch mehr Ameisen an. Falls die Nahrung ausgeht, wird die Spur schwächer und diffundiert weg – der „Ameisenverkehr“ versiegt.

In der Nähe des Nests ist die Pheromonkonzentration am höchsten, was die höhere Geschwindigkeit in Richtung Nest (TN) im Vergleich zu derjenigen vom Nest weg (AN) erklärt. Eine Begründung kann in der Informationstheorie gefunden werden (siehe unten).

Wenn man davon ausgeht, dass das Pheromon den Aggregatzustand von fest zu flüssig bei 16°C ändert, macht es Sinn, die Daten aufzuteilen (der Siedepunkt ist weit oberhalb der Umgebungstemperaturen). Unterhalb 16°C ($\vartheta \leq 16^\circ\text{C}$) ist zu erwarten, dass sich wesentlich weniger Pheromon verflüchtigt, als oberhalb dieser Temperatur.

Somit zeigen sich zwei Temperatur - Effekte, die auseinander zu halten sind. Die Verflüchtigung des Pheromons in Abhängigkeit von der Temperatur und die Stoffwechsel – Geschwindigkeitszunahme der wechselwarmen Ameisen mit der Temperatur.

Ein ähnliches Verhalten zeigen auch andere Ameisen-Arten, beispielsweise *Limetopum apiculetum*.

Die Auswertung des Arrhenius-Plot erlaubt interessante Aussagen (E_a , A).

$$k = A \cdot e^{(-E_a / (R \cdot T))}; \ln k = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln A;$$

Für den Übergangskomplex lässt sich der Frequenzfaktor A abschätzen mit:

$$A = \frac{k_B \cdot T}{h} \cdot e^{\Delta S^{**} / R};$$

$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ [J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}$; Boltzmann Konstante

$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ [J s}^{-1}\text{]}$; Planck'sches Wirkungsquantum

ΔS^{**} : Entropie des Komplexes. Das Pheromon ist zuerst in der Luft (grosse Entropie) und dann gebunden am Rezeptor der Ameisen-Antenne (kleine Entropie).

$$\Delta S^{**} = \ln \left[\frac{A \cdot h}{k_B \cdot T} \right] \cdot R;$$

A kann aus dem Arrhenius-Plot herausgelesen werden. Für die mittlere Temperatur 25°C lässt sich somit ΔS^{**} abschätzen.

Das Grundtheorem der Informationstheorie lautet: Der Informationsgehalt I eines Systems entspricht dem negativen dualen Logarithmus einer *Ereigniswahrscheinlichkeit* P_i . In unserem Fall ist P_i die Eintretenswahrscheinlichkeit dafür, dass genügend Spurpheromone die Antenne der Ameise treffen und da als Signal erkannt und weitergeleitet wird.

Informationsgehalt $I = -\log_2(P_i)$: wichtig: **negatives Vorzeichen!!**

I : Informationsgehalt in bit

\log_2 : Logarithmus zur Basis 2, Logarithmus dualis (ld)

$\log_2(a) = \log(a)/\log(2) = 3,322 \times \log(a)$

P_i : Ereigniswahrscheinlichkeit für das Ereignis i

$S = k \cdot \ln P_i$; $k = 1,38066 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

Folgerung:
Informationsgehalt und Entropie sind miteinander verknüpft.

$$S = 1,38066 \times 10^{-23} \cdot \ln P_i = 7,649 \cdot 1,3807 \cdot 10^{-23} \cdot \log_2(P_i) = 1,056 \cdot 10^{-22} \cdot \log_2(P_i)$$

$I = -\log_2(P_i) = -S / 1,056 \cdot 10^{-22} = 2$; Der Informationsgehalt muss für die Entscheidung der Spur zu folgen mindestens 1 bit sein, ja oder nein.

$S = -2,1 \cdot 10^{-22} \text{ JK}^{-1}$;

Für 1 Mol ($6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen): $S = -127 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$

Man kann die Information der Spur als Entropie ausdrücken. Je höher die Konzentration der Pheromone, desto kleiner ist die Entropie, desto grösser ist die Information oder umso stärker ist das Signal (molekulare Belegung der Rezeptoren an den Antennen der Ameisen).

Der Informationsgehalt kann über die Entropie auf eine bestimmte Temperatur (T_1) z.B. 298 K (25 °C) mit dem entsprechenden Volumen (V_1), bezogen werden.

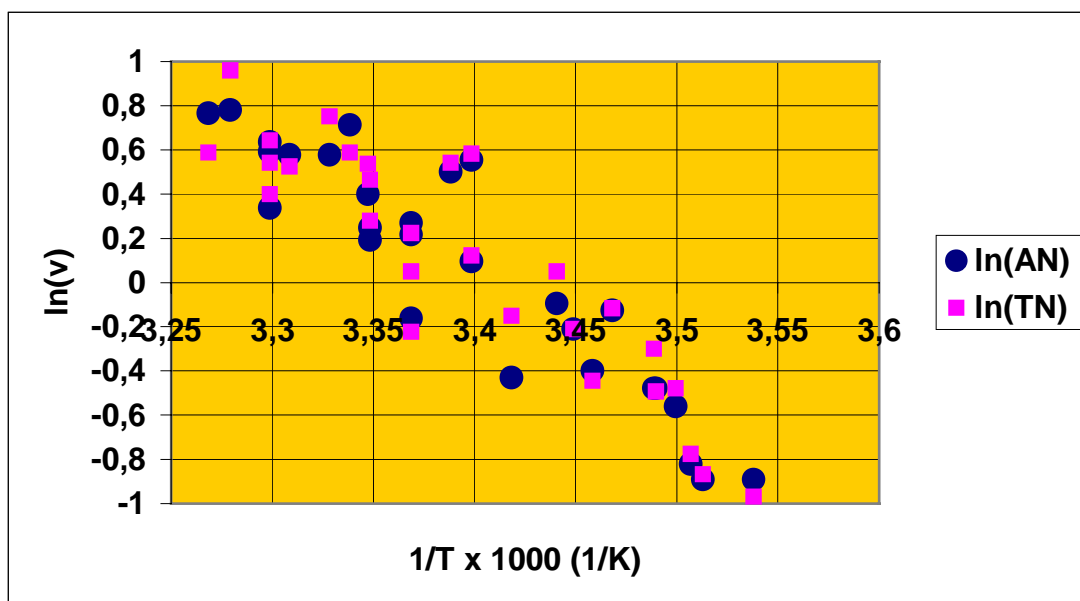
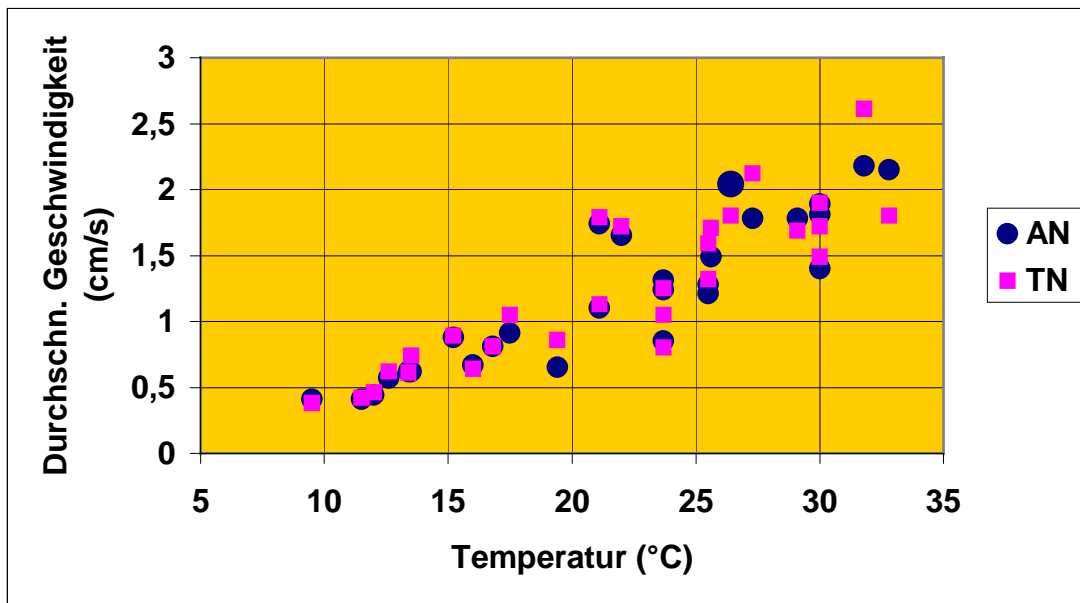
Aufgabe:

Beobachtungen. Man hat die Geschwindigkeit von Ameisen verfolgt, die sich vom Nest weg und auf das Nest zu bewegen. Von je 16 Ameisen hat man das Mittel genommen. Diese Messungen hat man mit der entsprechenden Umgebungstemperatur als Wertepaare aufgelistet.

Man interpretiere die Daten (Geschwindigkeit v in cm/s, AN vom Nest weg, TN zum Nest hin), T in °C: Umgebungstemperatur). Jedes Datenpaar (Temp./ v) ist das Mittel von 16 Ameisen.

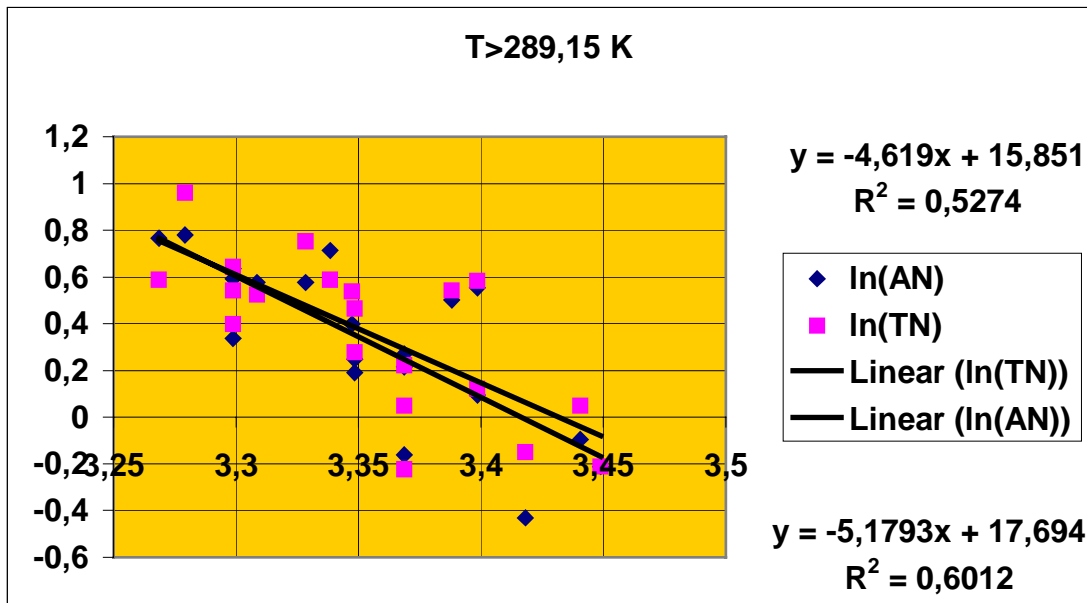
T (°C)	AN	TN	
32,8	2,15	1,8	Wie gross sind die Aktivierungsenergien (E_a) oberhalb 16°C und für die Temperaturen 16°C und darunter?
31,8	2,18	2,61	
30	1,89	1,72	Was kann man aus den Resultaten folgern?
30	1,4	1,49	
30	1,81	1,9	Man schätze die Entropie bei 25°C ab und interpretiere die Daten.
29,1	1,78	1,69	
27,3	1,78	2,12	Man beurteile den Informationsgehalt.
26,4	2,04	1,8	
25,6	1,49	1,71	
25,5	1,28	1,32	
25,5	1,21	1,59	
23,7	1,31	1,05	
23,7	1,24	1,25	
23,7	0,85	0,8	
22	1,65	1,72	
21,1	1,1	1,13	
21,1	1,74	1,79	
19,4	0,65	0,86	
17,5	0,91	1,05	
16,8	0,81	0,81	
16	0,67	0,64	
15,2	0,88	0,89	
13,5	0,62	0,74	
13,4	0,62	0,61	
12,6	0,57	0,62	
12	0,44	0,46	
11,5	0,41	0,42	
9,5	0,41	0,38	

Lösungen:

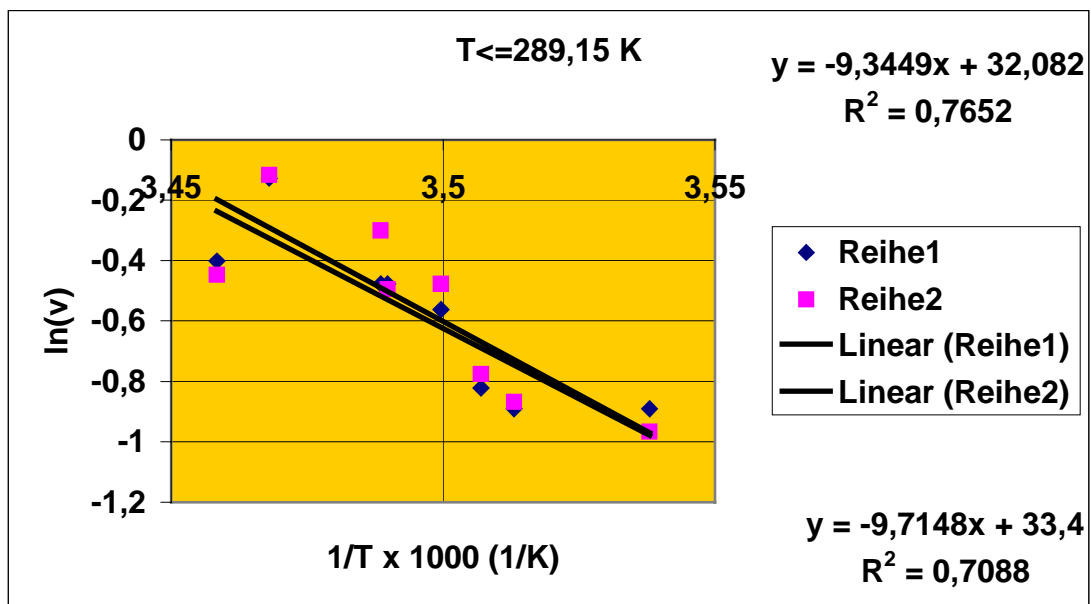


Folgerung:

1. Die Daten streuen sehr stark, was bei biologischen Experimenten nicht selten ist.
2. Selbst die Regressionsgeraden vermögen die Unterscheide von $v(\text{AN})$ und $v(\text{TN})$ nicht signifikant unterscheiden.
3. Der Arrhenius-Plot zeigt eine endotherme Reaktion an.



Darstellung: $y = a \cdot x + b$; $\ln k = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln A$



Auswertung der Trendlinien $y = ax + b$:

T [°C]	Richtung	a [K ⁻¹]	E _a [kJ mol ⁻¹]= -a*8,3145 (T x 1000 kJ)	A = e ^b =2,718 ^b	ΔS ^{**} [J K ⁻¹ mol ⁻¹]	Informationsgehalt [bit]
>16	AN	-5,2	43	7,26e6	-97,5	97,5/127 x 2 = 1,53
	TN	-4,6	38	4,56e7	-113	113/127 x 2 = 1,78
≤ 16	AN	-9,3	77	8,70e13	+33	
	TN	-9,7	81	3.19e14	+22	

Interpretationen:

1. Die Korrelationen der linearen Trendlinie sind noch einigermaßen brauchbar.
2. Die Aktivität der Ameisen steigt mit zunehmender Temperatur (endotherm), denn die Steigung bei höherer Temperatur im Plot mit $1/T$ ist kleiner.
3. Die Schmelztemperatur spielt eine beachtliche Rolle (Unterschied von E_a bei $T > 16^\circ\text{C}$ und $T \leq 16^\circ\text{C}$).
4. Bei Temperaturen unterhalb 16°C ist die Information positiv. Es könnte auch sein, die Entropien weisen darauf hin, dass die Bindung der Moleküle an den Antennen bei diesen Temperaturen nicht mehr erfolgt, weil die Antennentemperatur dann höher ist, als die Umgebungstemperatur.
5. $v(\text{AN})$ und $v(\text{TN})$ unterscheiden sich nicht sehr gut sichtbar, aber beim linearen Fit doch eindeutig.
6. Der Informationsgehalt des Spurpheromons in Richtung Nest (TN) ist ca. 10% höher, als der vom Nest weg (AN). Diese Aussage könnte aus den Mittelwerten von $v(\text{AN}) = 1,21$ und $v(\text{TN}) = 1,25$ nie gewonnen werden.
7. Die Entropie ist ganz knapp unterhalb der von 1 bit. Somit ist die Entscheidung nicht immer sichergestellt, ob die Ameise der Spur folgt oder nicht.

Folgerungen für den Unterricht

1. Man muss die obigen Rechnungen nicht unbedingt selbst durchrechnen können. Die aus den Beobachtungen gewonnenen Daten sind aber spannend genug, molekular diskutiert zu werden.
2. Es wurden nur ganz einfache Beobachtungen über die Geschwindigkeit von Ameisen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen gemacht.
3. Die doch zielich streuenden Daten – schon fast Sternenhimmel – lassen sich mathematisch auswerten.
4. Die Auswertungen führen zu ganz spannenden Schlüssen (Aktivierungsenergie, Entropie, Informationsgehalt).