

## Wasser als Träger und Vermittler der Wärme

(leicht erweiterte Fassung eines Vortrags, gehalten auf der Sommertagung 2019)

### Wärme – einführende Betrachtung

Von der Sonne empfängt die Erde Wärme. Auf dem Weg von der Sonne zur Erde, im Weltraum, ist es, wie wir heute wissen, sehr kalt und der Weltraum ist als Hochvakuum weitgehend materiefrei. Anders als das Licht der Sonne, das in der Begegnung mit Materie Farben entstehen lässt, durchdringt die Wärme der Sonne die Materie, erwärmt sie und verändert sie dabei zugleich. Die Temperaturen auf der Erde entstehen aus dieser Begegnung der Wärme der Sonne mit der irdischen Materie. Alles was fest, flüssig oder gasförmig ist, erwärmt sich tagsüber in der Sonne und kühlt nachts und an Tagen mit geringerer Sonneneinstrahlung wieder ab. So schwingt die Temperatur der Materie im Wechsel der Tages- und Jahreszeiten zwischen höheren und niedrigeren Werten. Aus diesem Wechselspiel zwischen Erwärmung und Abkühlung emanzipieren sich alle Lebewesen, die eine gleichmäßige Körpertemperatur haben, so auch wir Menschen.



Das Phänomen, dass sich Wärme von einem Ort zum anderen ausbreitet, ohne an Materie gebunden zu sein, bezeichnet die Physik als Wärmestrahlung. Wärmestrahlung erleben wir nicht nur bei der Sonne, sondern auch bei Kachelöfen oder von der Sonne aufgeheizten Häusern und beim Erdboden. Haben sich Luft oder Wasser von der Sonne erwärmt und strömen in der Atmosphäre oder in den Meeren, so tragen sie in sich die Wärme, die sie aufgenommen haben. Diese zweite Möglichkeit, durch die Wärme von einem Ort zum anderen gelangt – gemeinsam mit erwärmter Materie –, bezeichnet die Physik als Konvektion, manchmal auch Wärmemitführung genannt. Eine dritte Möglichkeit für die Bewegung von Wärme gibt es: Berühren sich zwei Gegenstände unterschiedlicher Temperatur, beispielsweise eine Herdplatte und ein Topf darauf, so erwärmt sich der kältere. Vergleichbares geschieht, wenn innerhalb eines Gegenstandes ein Temperaturunterschied besteht. Dieses Phänomen heißt Wärmeleitung.

### Wassereigenschaften und Wärme – Besonderheiten<sup>1</sup>

Substanzen reagieren, wenn sie erwärmt werden, auf die zugeführte Wärme unterschiedlich schnell mit einer Temperaturerhöhung. Die spezifische Wärmekapazität – wie diese Stoffeigenschaft heißt – ist beim Wasser im Vergleich zu

<sup>1</sup> Wesentliche Anregungen zu diesem Abschnitt verdanke ich der Darstellung „Vom Wesen des Wassers in der Natur“ von Theodor Schwenk (1)

anderen Stoffen sehr hoch. So trägt Wasser, wenn es von einem Ort der Erde zu einem anderen strömt, sehr viel Wärme mit sich und wirkt temperaturlausgleichend zwischen den verschiedenen Erdregionen. Das bekannteste Beispiel dafür ist der Golfstrom.

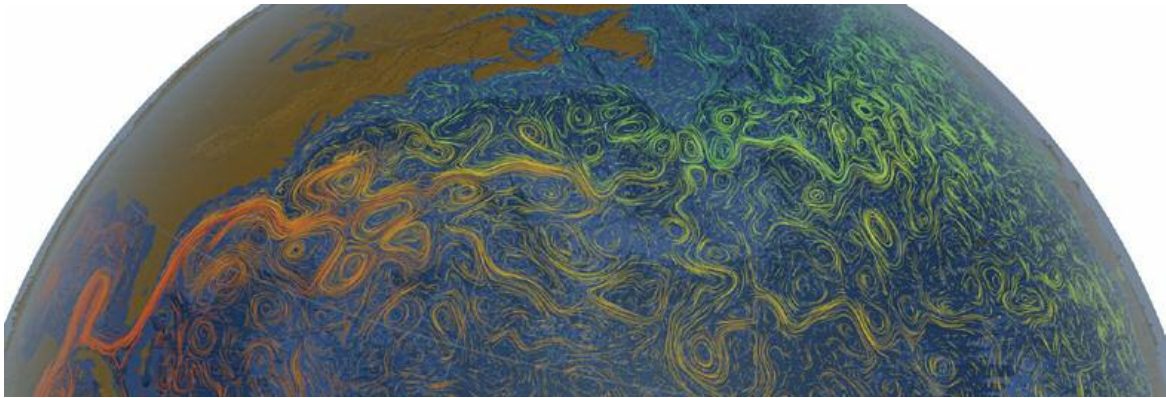
Auch im zeitlichen Verlauf der Jahreszeiten ist die spezifische Wärmekapazität des Wassers wichtig. Seen und Meere erwärmen sich im Sommerhalbjahr langsamer als Land und kühlen im Winterhalbjahr langsamer wieder ab. So haben Orte, die in der Nähe großer Seen oder des Meeres liegen, einen ausgeglicheneren Temperaturverlauf über das Jahr als Orte, die inmitten der Kontinente liegen. Auch die Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht sind an Orten am Wasser niedriger.

Wasser ist die einzige Substanz, die auf der Erde in großem Maßstab sowohl fest (als Eis, Schnee, Hagel, Raureif), flüssig (in den Fließgewässern, im Boden und als Nebel oder Wolken in der Luft) als auch gasförmig vorkommt. Alle Übergänge zwischen diesen Erscheinungszuständen des Wassers sind von Wärmeprozessen begleitet.

Schmilzt Eis zu Wasser, so benötigt es dazu Wärme. Im Vergleich zu anderen Stoffen ist die Schmelzwärme des Wassers sehr hoch. In Versuchen lässt sich messen, dass beim Schmelzen etwa so viel Wärme gebraucht wird, wie nötig ist, um das geschmolzene Wasser auf 80°C zu erwärmen! Gefriert das Wasser – beispielsweise im Winter – zu Eis, so gibt es eine gleich große Menge Wärme wieder in seine Umgebung ab. In der Frostschutzberechnung kann Wasser auf diese Weise, fein versprüht auf die Blüten von Obstbäumen, diese vor dem Erfrieren schützen, indem es selbst gefriert. So mildert das Wasser, wenn es auf Seen oder den Polarmeeren zu Eisdecken gefriert, das Absinken der Lufttemperatur in der Umgebung.

Die Verdampfungswärme des Wassers ist noch viel größer als seine Schmelzwärme. Verdunstet Wasser oder verdampft es im Sieden, benötigt dieser Prozess fast sieben Mal (6,74) so viel Wärme wie das Schmelzen. So kommt es, dass wir nach dem Duschen frösteln, und im Erdzusammenhang kühlen Meere und Seen ab, aus denen Wasser verdunstet, ebenso der Boden. Die Vegetation der Erde ist für den Übergang von flüssigem zu gasförmigem Wasser ebenfalls von großer Bedeutung. Auch Pflanzen lassen Wasser verdunsten und kühlen in diesem Prozess, Transpiration genannt, die Umgebungsluft ab. Beim umgekehrten Prozess des Kondensierens von Wasser – sei es als Wolken, als Nebel oder als Tau –, wird Wärme in die Umgebung abgegeben.

So wirkt Wasser durch seine hohe Wärmekapazität, seine hohe Schmelzwärme und seine hohe Verdampfungswärme über verschiedene Erdregionen und im



**Abbildung 1:** Der Golfstrom ist ein Beispiel für die Fähigkeit des Wassers, mit sich Wärme über die Erde zu tragen. Diese Darstellung ist eine Visualisierung des Golfstroms mit seinen Strömungen und Oberflächentemperaturen. Die Temperaturen der Strömungen sind farblich dargestellt, von blau (0°C) über gelb (17°C) bis rot (33°C).

zeitlichen Verlauf der Jahreszeiten sowie im Wechsel von Tag und Nacht temperaturlausgleichend.

Das Leben auf der Erde ist an eine vergleichsweise kleine Temperaturspanne gebunden. Im Wechselspiel mit der Atmosphäre und den Böden sowie ihren jeweiligen Wärmeeigenschaften sind es wesentlich auch die Eigenschaften des Wassers, die von großer Bedeutung sind, um die Wärmeeinstrahlung der Sonne in für das Leben geeignete Wärmeverhältnisse zu wandeln. Diese sensible Balance ist heute durch den Klimawandel gestört, der auch den Wasserkreislauf bereits verändert.



### **Wasser, Wärme und die Entwicklung der Naturwissenschaft**

Ein historischer Rückblick zeigt: Einen messenden Zugang zu Wärmephänomenen gibt es erst seit der Neuzeit. Beginnend mit dem 17. Jahrhundert entstanden erste Thermometer, die ein Maß für Wärme suchten. Dass Luft sich beim Erwärmen ausdehnt und im Abkühlen wieder zusammenzieht, war zwar bereits im Altertum beobachtet worden, eine Temperaturskala gab es

**Abbildung 2:** Im Gefrieren gibt Wasser Wärme an seine Umgebung ab – Apfelblüten nach einer Frostschutzberegnung



**Abbildung 3:** *Wärmevorgänge begleiten das Verdunsten und Kondensieren. Die Sonne beginnt nach dem Regen die Landschaft wieder zu trocknen (links) und Tau am Morgen (rechts).*

jedoch nicht. Mit dem Flüssigkeitsthermometer – in dem eine Flüssigkeit in engen Glasröhren eingeschlossen ist und sich unabhängig vom atmosphärischen Luftdruck mit der Temperatur ausdehnt bzw. zusammenzieht – gelang es im 18. Jahrhundert erstmals, eine Skala zu entwickeln. Als Thermometerflüssigkeit war das Wasser nicht geeignet. Es dehnt sich nicht gleichmäßig aus, hat es doch sein Dichtemaximum bei 4°C. Andere Eigenschaften des Wassers dienten aber dazu, die noch heute im Alltag gebräuchliche Celsius-Skala festzulegen. Während Eis zu Wasser schmilzt, ändert sich die Ausdehnung von Quecksilber oder Alkohol, gebräuchlichen damaligen Thermometerflüssigkeiten, nicht. Ebenso bleibt ein Quecksilberthermometer auf gleicher Höhe, während Wasser siedet. So dienten die Schmelz- und die Siedetemperatur des Wassers als Eichpunkte der ersten Thermometer und sind in der Celsius-Skala auf 0°C und auf 100°C festgelegt. Indem der Abstand zwischen diesen beiden Höhen eines Quecksilberthermometers in 100 gleiche Teile geteilt wurde, entstand die Temperatureinheit Grad Celsius. (Dass auch der Luftdruck die Übergänge des Wassers zwischen festem, flüssigem und gasförmigem Zustand beeinflusst, war bei der Entwicklung der ersten Temperaturskalen nicht bekannt.)

Das Thermometer war die Voraussetzung, um eine zweite quantitative Größe zu entwickeln, die Wärmephänomene in Zahlen erfasst: die Wärmemenge. Wieder diente das Wasser mit seinen Eigenschaften als Maß. Mischungsversuche, in denen Flüssigkeitsmengen unterschiedlicher Temperatur, Menge und Art zusammen gegeben wurden, legten die erste Einheit fest, die Calorie (von lateinisch calor Wärme). Eine Calorie ist die Wärmemenge, die ein Gramm Wasser um 1°C erwärmt. (Heute ist die Calorie in der Wissenschaft nicht mehr in Gebrauch.)



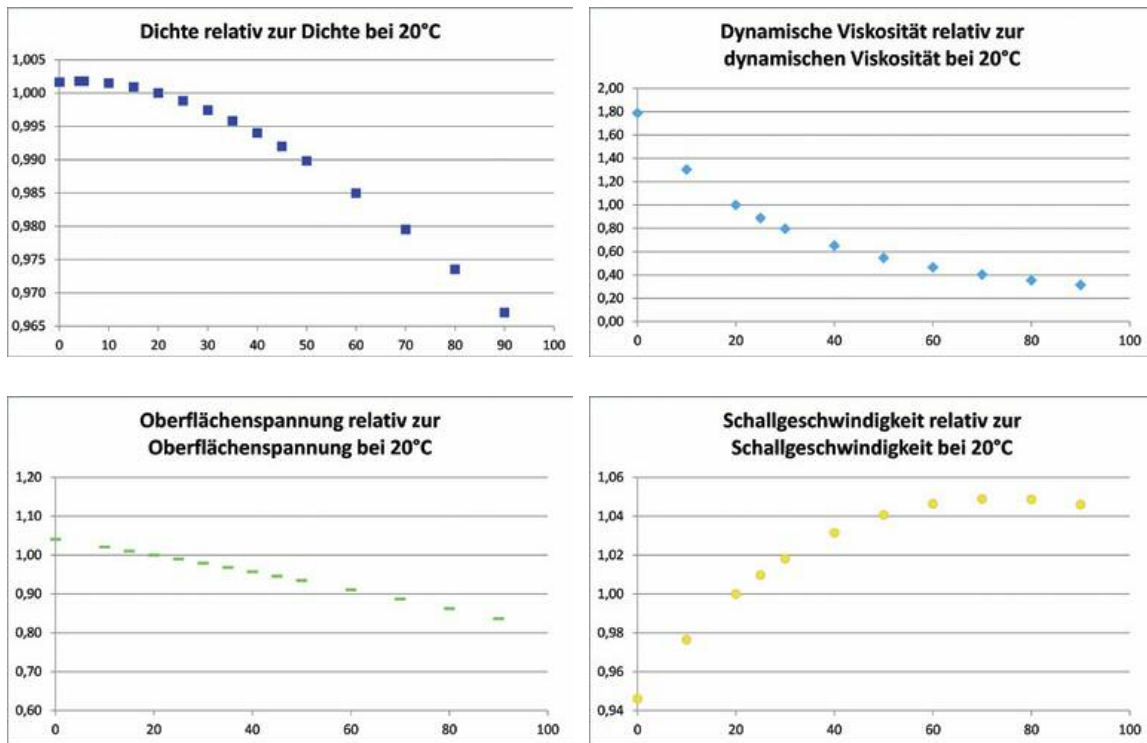
In der Entwicklung der heutigen Einheit der Energie Joule war es eine weitere Beziehung des Wassers zur Wärme, die als Grundlage der Quantifizierung diente: Indem Wasser umgerührt wird, erwärmt es sich. In einem berühmten Versuch ließ James Prescott Joule ein Gewicht herabsinken, das dabei durch eine Umlenkvorrichtung eine Wassermenge umrührte, deren Temperaturerhöhung er maß.

So suchte das menschliche Erkenntnisvermögen ab dem 17. Jahrhundert die Wärme – und fand eine Vielzahl von Stoffeigenschaften, und auch Bewegungsvorgänge, die mit Wärmevorgängen in Beziehung stehen. Gleichzeitig ermöglichte der messende Zugang zu Phänomenen von Temperatur und Wärmemenge unsere heutige Naturwissenschaft und Technik. Die Entwicklung des Thermometers war beispielsweise Voraussetzung, um Ende des 18. Jahrhunderts das metrische System festzulegen: Der Urmeter – ein Metallstab, der zum Eichen benutzt wurde – ist nicht bei jeder Temperatur exakt einen Meter lang und das Urkilogramm wog soviel, wie im Rahmen der damaligen Messgenauigkeit ein Kilogramm Wasser an seinem Dichtemaximum bei 4°C. Heute sind beide Einheiten anders festgelegt.

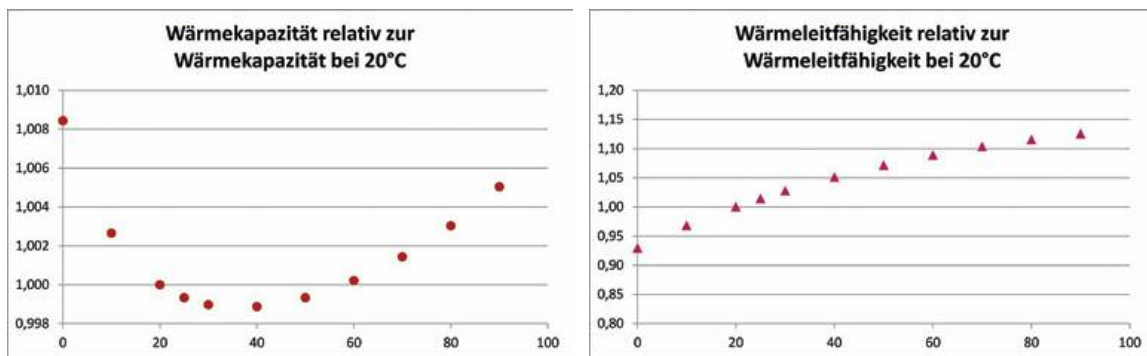
### ***Wassereigenschaften ändern sich mit der Temperatur***

Dank des Messwesens, das sich mit dem metrischen System und der Existenz von Thermometern weltweit vereinheitlichte und fortentwickelte, wissen wir heute, dass alle Materie ihre Eigenschaften mit steigender und fallender Temperatur ständig ändert, so auch im Wechsel von Tag und Nacht, Sommer und Winter. Für Wasser sind in Abbildung 4 Veränderungen ausgewählter Eigenschaften mit der Temperatur dargestellt. Die Eigenschaften sind nicht in absoluten Zahlen, sondern im Verhältnis zum Zahlenwert der jeweiligen Eigenschaft bei 20°C abgebildet. Daher ist bei 20°C der dargestellte Wert für alle Eigenschaften genau 1. Abbildung 5 veranschaulicht gleichzeitig, wie sich die verschiedenen Eigenschaften mit der Temperatur unterschiedlich stark ändern.

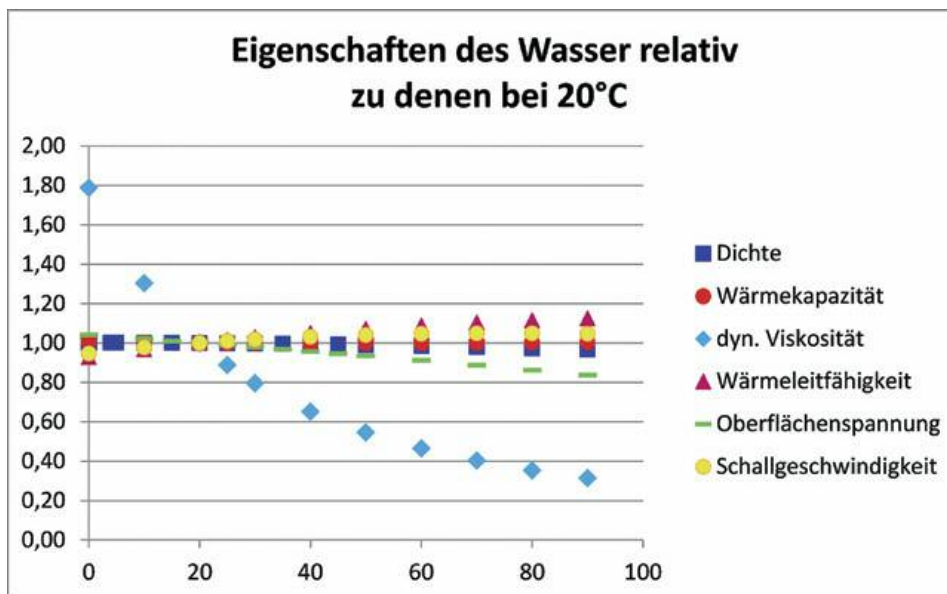
Dichteänderungen sind am geringsten und liegen in der Temperaturspanne, die die meisten Oberflächengewässer im Wechsel der Jahreszeiten durchlaufen, im Promillebereich. Das Dichtemaximum des Wassers bei 4°C ist in Abbildung 1 nur zu ahnen, so stark ist im Vergleich die Verringerung der Dichte bei höheren Temperaturen. Diese Dichteänderungen mit der Temperatur – entstehend dank der Wärmeausdehnung des Wassers – sind in stehenden Gewässern von großer Bedeutung. Die Seeoberfläche erwärmt sich durch die Sonne oder sie kühlt bei winterlichen Lufttemperaturen stark ab. So ändert sich die Dichte lokal unterschiedlich stark, auch zwischen beschatteten und nicht beschatteten Bereichen, und Strömungen entstehen. Im Wechsel der Jahreszeiten zirkuliert in manchen



**Abbildung 4a:** Jede Temperaturänderung verändert Dichte, Oberflächenspannung, dynamische Viskosität und Schallgeschwindigkeit des Wassers, Eigenschaften, die auch mit strömungsphysikalischen Kräften in Zusammenhang stehen. Auf der horizontalen Achse ist jeweils die Temperatur in °C aufgetragen. (Zum Quellennachweis siehe das Literaturverzeichnis.)



**Abbildung 4b:** Auch die Beziehung des Wassers zur Wärme ändert sich mit der Temperatur. Auf der horizontalen Achse ist jeweils die Temperatur in °C aufgetragen. Zum Quellennachweis siehe das Literaturverzeichnis.



**Abbildung 5:** Eine vergleichende Darstellung mit demselben Maßstab auf der vertikalen Achse zeigt, wie jede Temperaturänderung die einzelnen Eigenschaften des Wassers unterschiedlich stark verändert, sie in neue Verhältnisse zueinander bringend. Auf der horizontalen Achse ist die Temperatur in °C aufgetragen.

Seen in den gemäßigten Breiten im Herbst und Frühjahr das gesamte Wasser. Alles wird durchmischt, Luft in tiefere Seeschichten getragen.

So veranschaulicht eine genaue Betrachtung der physikalisch-chemischen Ebene des Wassers, wie jede Temperaturveränderung verschiedene Wassereigenschaften in eine neue, gegenseitige Beziehung bringt. Nie ändert sich mit der Temperatur nur eine Eigenschaft. Je nach Temperaturverhältnissen entstehen auf diese Weise Strömungen, werden Instabilitäten durchlaufen, treten vielleicht sogar Gestaltbildungsvorgänge auf. Wasser im Sommer oder im Winter, Schmelzwasser eines Gletschers, das Wasser tropischer Flüsse und Seen – alle Wässer sind nicht nur von ihrem jeweiligen Untergrund und ihrer landschaftlichen Umgebung geprägt, sondern auch von den jeweiligen Wärmebedingungen.

Indem Wasser strömt, entstehen zugleich neue Wärmephänomene. Denn strömendes Wasser erwärmt sich. Dies kann je nach Bedingungen sehr wenig sein oder deutlich messbar. In vielen praktischen Problemen des Ingenieurwesens misst man die Erwärmung nicht selbst, sondern mithilfe anderer Messgrößen als sogenannten Energieverlust.

So hat flüssiges Wasser eine Doppelbeziehung zur Wärme: Wärme verändert die Wassertemperatur und damit alle Eigenschaften des Wassers und ihre gegenseitige Beziehung. Zugleich entstehen mit jeder Strömung im Wasser neue Wärmevorgänge.



**Abbildung 6:** Erwärmen bringt Wasser ins Strömen: In ruhig stehendem frischem Quellwasser, oder in Wasser von Raumtemperatur, bilden einfallende Tropfen verdünnter Tinte Ringwirbel, die sich in kleinere Kaskaden teilen und langsam nach unten sinken (links). In Quellwasser, das frisch geschöpft wurde und zwei Stunden in der Sonne stand, ziehen sich die Ringwirbel hingegen zu Tintenschleiern aus. Der Innenraum des Wassers ist in ständiger Bewegung, Fotos können dies nur annähernd wiedergeben (rechts u. rechte Seite). Zugleich kann das sonnenerwärmte Wasser weniger Luft halten als das frische, kalte Quellwasser und es bilden sich Luftblasen (an der Glaswand zu sehen).

### **Wasser und Wärme – aus der Forschung in Herrischried**

Am Institut für Strömungswissenschaften in Herrischried werden Qualitäten des Wassers untersucht, die über die Analyse seiner Inhaltsstoffe hinausgehen – wobei Letzteres je nach Fragestellung auch stattfindet.

Bei der Untersuchung von Wasserproben ist ein Ergebnis der langjährigen Forschungsarbeit: Ein Wasser wird neu empfänglich für Einflüsse aus der Umgebung, wenn es bewegt wird bzw. strömt. Wird es hingegen in Ruhe aufbewahrt, so bleiben die Einflüsse im Wesentlichen erhalten. Spricht sich in diesem Phänomen eine Vermittlerrolle der mit der Bewegung des Wassers entstehenden Wärme aus? Rudolf Steiner beschreibt die Wärme als zwischen der materiellen und der nicht-materiellen Welt stehend und zwischen beiden vermittelnd (2). Für den Menschen, so führt er Medizinern gegenüber aus, gibt die Wärme dem Seelisch-Geistigen des Menschen die Möglichkeit, in den Leib einzugreifen und verändernd bis auf die physische Ebene zu wirken (3). Gilt Vergleichbares für



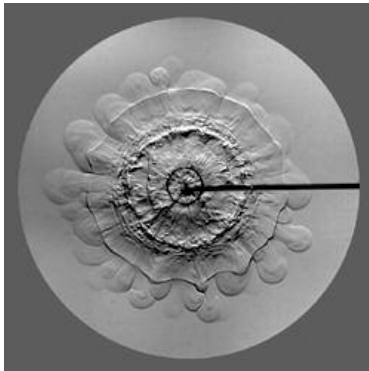


die gesamte Erde? Hätte dann das Wasser in seiner vielfältigen Beziehung zur Wärme hierbei eine zentrale Rolle – zusammen mit der Luft und ihrer Beziehung zur Wärme?

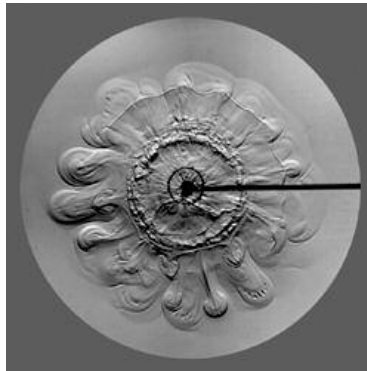
Einige Beispiele aus Tropfbildversuchen sollen die große Bedeutung von Wärmevorgängen veranschaulichen, die bei der Durchführung dieser Labormethode beachtet werden müssen. Bei der Tropfbildmethode wird eine Wasserprobe durch Tropfen hereinfallenden, destillierten Wassers zum Strömen angeregt. Mithilfe eines Glyzerinzusatzes zur Probe werden die entstehenden Strömungsbilder durch eine Schlierenoptik für das Auge sichtbar. Im Zuge der Standardisierung der Tropfbildmethode wurden unzählige Versuche durchgeführt, u.a. zum Einfluss der Temperatur und weiterer Wärmevorgänge (4). Im WASSERZEICHEN Nr. 4 stellt Andreas Wilkens dar, wie bei der Vorbereitung der Tropfbildschalen, an den sich bildenden und fallenden Tropfen sowie an der Probenoberfläche in der Tropfbildschale Verdunstungsvorgänge stattfinden, die feine Abkühlungen bringen. Diese Prozesse bei verschiedenen Versuchsserien konstant zu halten, so führt er aus, ist für den Tropfbild-Versuch von hoher Wichtigkeit. Dies bedeutet, während Tropfbilduntersuchungen immer gleiche Zeitintervalle einzuhalten, während der diese Verdunstungsvorgänge stattfinden. Der Tropfbildversuch erhält auch durch diese Wärmevorgänge eine Zeitgestalt (5).

Als Beispiel für den großen Einfluss, den eine Veränderung der Temperatur des eintropfenden Wassers hat – die Temperatur der Probe ist unverändert – sind in Abbildung 7 Tropfbilder des 9., 18. und 25. Tropfens wiedergegeben (6).

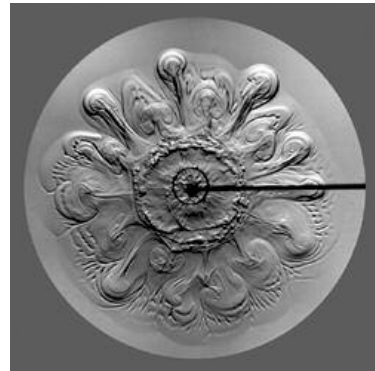
*Temperierung des eintropfenden Wassers auf 27°C*



9.Tr.

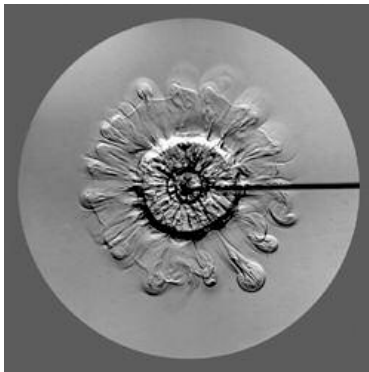


18. Tr.

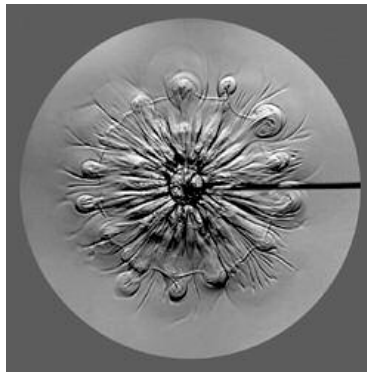


25. Tr.

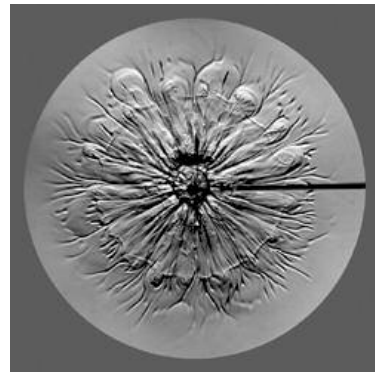
*Temperierung des eintropfenden Wassers auf 20°C (Standard)*



9.Tr.

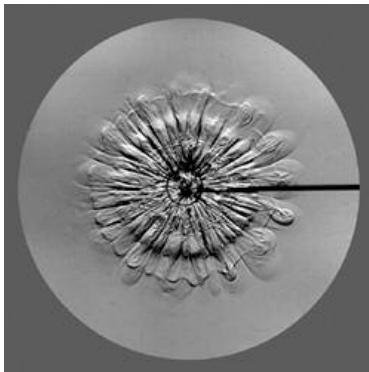


18. Tr.

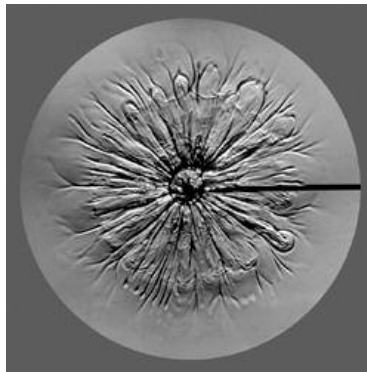


25. Tr.

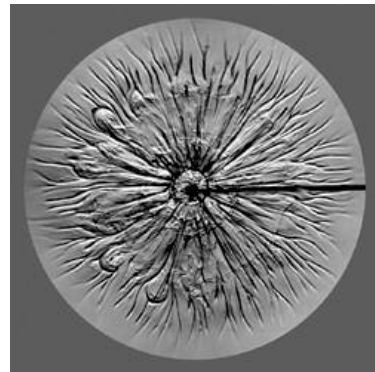
*Temperierung des eintropfenden Wassers auf 15°C*



9.Tr.

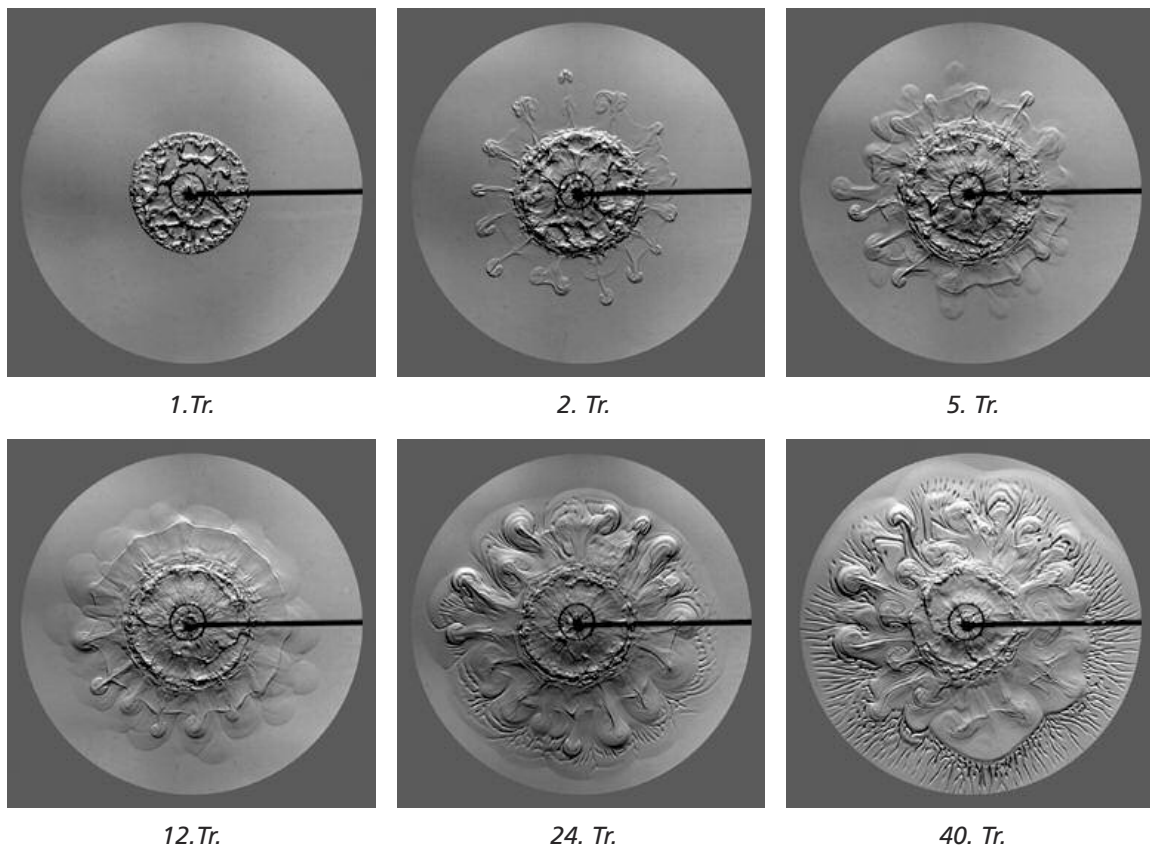


18. Tr.



25. Tr.

**Abb. 7:** Tropfbilder von Versuchen mit Eintropfwasser unterschiedlicher Temperatur zu Versuchsbeginn. Während des Versuches stand das eintropfende Wasser im Wärmeaustausch mit der Umgebung.



**Abb. 8:** Weitere Tropfbilder des Versuches, bei dem das Eintropfwasser vor Versuchsbeginn auf 27°C erwärmt wurde

Bei Eintropfwasser, das vor Versuchsbeginn auf 27°C erwärmt wurde, sind die Wirbel breiter, größer und weniger konturiert als bei dem Temperaturstandard von 20°C. Der Kernbereich des Tropfbilds ist größer. Auch treten weniger linienförmige Strukturen im äußeren Bildrand auf – ganz im Gegensatz zu 15°C kaltem Eintropfwasser. Weitere Bilder des Versuches, in dem das Eintropfwasser vor Beginn des Versuches auf 27°C erwärmt wurde, zeigt Abbildung 8.

Die Beispiele veranschaulichen, mit welcher hohen Sorgfalt im Tropfbildlabor gearbeitet werden muss. Um nicht Wärmeprozesse im Tropfbild zu sehen, sondern die Qualitäten der Probe, ist die Labortemperatur standardisiert und ebenso sind alle Schritte des Versuchsablaufs, die mit einem Verdunstungsgeschehen einhergehen, zeitlich standardisiert. Zugleich macht diese hohe Empfindlichkeit für Wärmevorgänge das Tropfbild zu einem Strömungsgeschehen großer Offenheit und Sensibilität.

### *Ausblick*

Mit einigen Gedanken möchte ich wieder an die zu Beginn ausgeführte Bedeutung des Wassers für den Wärmehaushalt der Erde anschließen: In der heutigen Technik wird nur die äußere, quantitative Seite der Wärme betrachtet und technisch genutzt. Wärme wird im Hinblick auf ihren energetischen Aspekt betrachtet, als Energie, von der der Träger des Nobelpreises für Physik Richard Feynman sagte (7): „Es ist wichtig, einzusehen, dass wir in der heutigen Physik nicht wissen, was Energie ist. Wir haben kein Bild davon, dass Energie in kleinen Klumpen definierter Größe vorkommt. So ist es nicht. Jedoch gibt es Formeln zur Berechnung einer numerischen Größe und wenn wir alles zusammenaddieren, ergibt es (...) immer die gleiche Zahl. Es ist eine abstrakte Sache insofern, als es uns nichts über den Mechanismus oder die Gründe für die verschiedenen Formeln mitteilt.“

Die vielfältigen Beziehungen, die Wärmeprozesse im Naturgeschehen haben, weisen weit über den energetischen Aspekt von Wärme hinaus. Nichts vollzieht sich, ohne dass Wärmevorgänge beteiligt sind – sei es der Stoffwechsel der Lebewesen, seien es Phasenübergänge zwischen fest-flüssig-gasförmig, seien es physikalisch-chemische Vorgänge, chemische Reaktionen oder Bewegungsvorgänge in Wasser und Luft, um nur Einiges zu nennen. Wärme beeinflusst alles Geschehen auf der Erde ganz grundlegend. Hierin unterscheidet sie sich von anderen Energieformen, mit denen sie hinsichtlich ihres energetischen Aspekts zahlenmäßig in Beziehung gesetzt werden kann.

Die Doppelbeziehung des Wassers zur Wärme, das auf Temperaturänderungen mit einer Veränderung all seiner Eigenschaften reagiert und dessen Strömen selbst von Wärmevorgängen begleitet wird, kann ahnen lassen, wie nicht-materielle, ätherische Kräfte mittels der Wärme in der physischen Materie des Wassers wirksam werden können und wie umgekehrt strömendes Wasser einen Einfluss auf seine ätherische Umgebung hat. Sich dieser Beziehung von Wasser und Wärme zu nähern ist Anliegen dieses Beitrags.

*Imke Naudascher*



## Literatur

- 1) Theodor Schwenk, Vom Wesen des Wassers in der Natur, WASSERZEICHEN Nr. 3, Herrischried, 1996 (Neuabdruck eines Beitrags aus „Mitteilungen der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Weleda AG Arlesheim und Schwäbisch Gmünd für Ärzte...“ Nr. 11, Mai 1970)
- 2) Rudolf Steiner, Geisteswissenschaftliche Impulse zur Entwicklung der Physik, Zweiter naturwissenschaftlicher Kurs, 11. Vortrag vom 11. März 1920, GA 321, Rudolf Steiner Verlag, 3. Auflage 1982
- 3) Rudolf Steiner, Meditative Betrachtungen und Anleitungen zur Vertiefung der Heilkunst, 1. Vortrag vom 2. Januar 1924, GA 316, Rudolf Steiner Verlag, 5. Auflage 2008
- 4) Andreas Wilkens, Michael Jacobi & Wolfram Schwenk, Die Versuchstechnik der Tropfbildmethode – Dokumentation und Anleitung, Sensibles Wasser 5, Herrischried 2000
- 5) Andreas Wilkens, „Tätigkeiten des Wassers“ im Verborgenen – einige Beobachtungen, WASSERZEICHEN Nr. 4, Herrischried 1997
- 6) siehe auch: Andreas Wilkens, Michael Jacobi & Wolfram Schwenk, Die Versuchstechnik der Tropfbildmethode – Dokumentation und Anleitung, Sensibles Wasser 5, S. 3-41, Herrischried 2000
- 7) Richard Feynman, Vorlesungen über Physik, Band I, Kap. 4.1 (Übersetzung: Heinz Köhler), Seite 46, Oldenbourg München Wien, 5. Aufl. 2007

Der Abschnitt „Wasser, Wärme und die Entwicklung der Naturwissenschaft“ hat verschiedene Quellen als Grundlage (auf Begriffe aus der Thermodynamik habe ich zugunsten einer allgemeinverständlichen Darstellung verzichtet):

- Becker, F., Über die Natur der Wärme – Verschlungene Wege zur wissenschaftlichen Erkenntnis, Franz Steiner Verlag Stuttgart, 1996
- Lexikon der Physik in sechs Bänden, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, 1998
- Mach, E., Die Principien der Wärmelehre - Historisch kritisch entwickelt, Verlag von Johann Ambrosius Barth, 4. Auflage, Leipzig 1923
- Smorodinskij, J.A. mit Ziesche, P., Was ist Temperatur? – Begriff, Geschichte, Labor und Kosmos, Verlag Harri Deutsch, 2000
- Tipler, P.A. & Mosca, G., Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 2007
- Medienberichte und Wikipedia-Einträge zur Neufestlegung des Kilogramms zum 20. Mai 2019 (z.B. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kilogramm>)

Die Berechnung der Größe der Eigenschaften des Wassers im Verhältnis zur jeweiligen Größe bei 20°C ist selbst durchgeführt. Die Zahlengrundlage für diese Berechnung und damit für die Abbildungen 4 und 5 ist entnommen aus

- a) für die Dichte: <https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/w/wasserdichtetabelle.php>
- b) für die Oberflächenspannung (die Werte gelten nicht für Normaldruck, sondern für den jeweiligen Sättigungsdampfdruck):  
[https://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung\\_Chemie/\\_Stoffdaten\\_Wasser](https://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_Stoffdaten_Wasser)
- c) für alle anderen Stoffeigenschaften: Haynes, W.M., Lide, D.R. & Bruno, T.J., CRC Handbook of Chemistry and Physics, 97th edition, S. 6-1 folgende, CRC Press 2016-2017

### ***Bildnachweise***

Abb. 1: Wikimedia common, NASA Scientific Visualization Study: Gulf stream Sea Surface Currents and Temperatures, 15. Februar 2012, gemeinfrei. Die Legende zum Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und den dargestellten Farben ist zu finden auf <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=3913>.

Abb. 2: Wikimedia Commons, Lämpel, 20. April 2017, CC BY-SA 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>

Abb. 3 links: Wikimedia Commons, Ulrike Hergert, 12. Mai 2019, CC BY-SA 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>

alle anderen Abbildungen: Institut für Strömungswissenschaften