

VEREIN FÜR BEWEGUNGSFORSCHUNG e.V. INSTITUT FÜR STRÖMUNGSWISSENSCHAFTEN

HERRISCHRIED IM SÜDSCHWARZWALD

Strömungsdynamische Untersuchung (Tropfbildmethode)

Die Strömungseigenschaften erlauben eine Aussage über einen wichtigen positiven Qualitätsaspekt des Wassers, liefern jedoch keine analytische Bestimmung der im Wasser gelösten chemischen Inhaltsstoffe. Diese Methode ist ein physikalisches, bildschaffendes Untersuchungsverfahren für Wasser und wässrige Lösungen, in denen Strömungsprozesse angeregt werden. Hierdurch wird dem Wasser Gelegenheit zu gestaltender Strömung unter standardisierten Bedingungen gegeben. Trinkwässer aus natürlich reinen, unbeeinträchtigten Grundwässern zeigen ein Optimum an Beweglichkeit und somit ein Maximum an vielgestaltigen Strömungsformen. Beeinträchtigte Wässer bewegen sich probentypisch verändert, beispielsweise schwächer differenziert.

Durchführung

Die als dünne Schicht in einer Tropfbildschale ruhende Wasserprobe, die einen Zusatz von Glycerin enthält, wird durch regelmäßig hereinfallende Tropfen destillierten Wassers zur Bewegung angeregt. Die entstehenden Strömungsmuster werden mittels einer Schlierenapparatur sichtbar gemacht und fotografisch dokumentiert (Abb. A).¹ Die zu untersuchende Probe wird außer dem Glycerinzusatz keiner Vorbehandlung, auch keiner Filtration oder ähnlichem unterzogen. Eine Kurzfassung der Laborparameter gibt die Tabelle A.

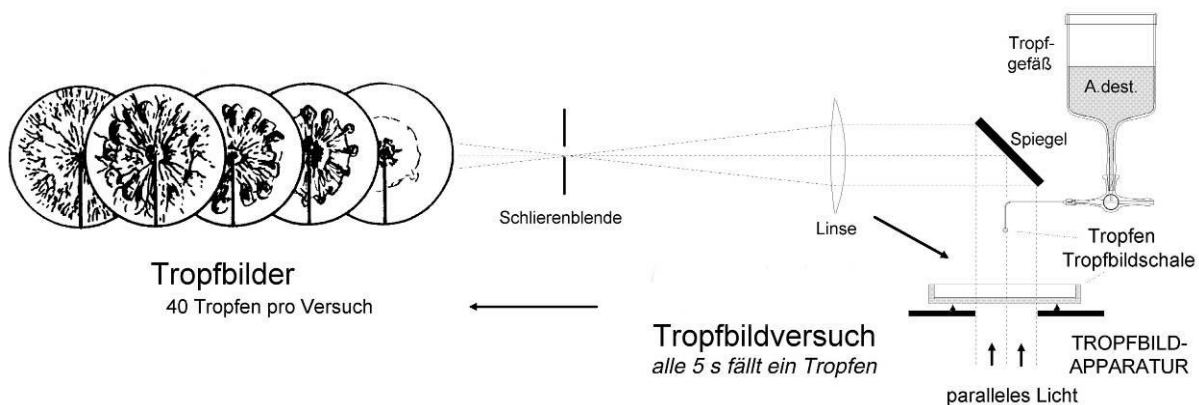


Abb. A: Versuchsanordnung der strömungsdynamischen Untersuchung (Tropfbildmethode)

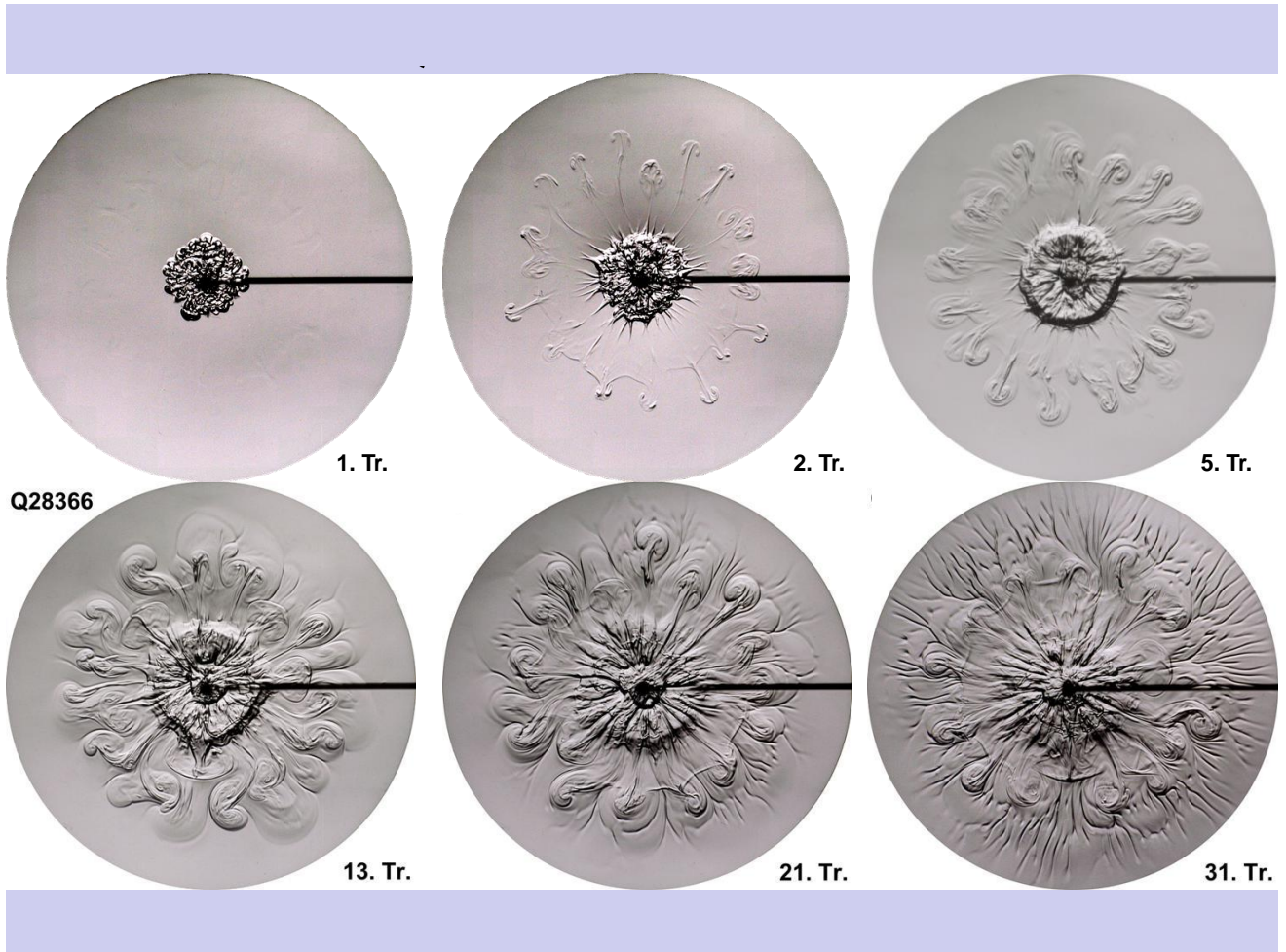
Tropfbild-Schale	Küvette (5 mm Duranglas, ähnlich Petrischale) mit für schlierenoptische Verfahren geeignetem planparallelem Boden und Innendurchmesser von 140 ± 1 mm
Füllmenge	20 ml, bestehend aus $17,5 \pm 0,1$ ml Wasserprobe und $2,5 \pm 0,15$ ml Glycerin, Schichthöhe bei A. dest. 1,1 mm
Glycerin	$85\% \pm 0,5\%$ reinst p.a., Reag. Ph Eur Wasserprobe und Glycerin werden 63 min vor Versuchsbeginn gemischt.
Tropfwasser	Aqua dest., dampfdestilliert
Tropfgewicht	$15,55 \pm 0,05$ mg
Tropfen-Fallhöhe	$101,5 \pm 0,2$ mm, vom Kanülenrand zum Schalenboden gemessen
Tropf-Folge	$5 \pm 0,2$ sec
Labor-Temperatur	20 ± 1 °C
Luftfeuchtigkeit	$60\% \pm 10\%$ relative Feuchte der Raumluft
Fotografie	$1,5 \pm 0,3$ sec nach Tropfenaufprall des ersten bis 40. Tropfen

Tabelle A: Versuchsparameter unter Standardbedingungen

¹ Näheres siehe Wilkens *et al.* (2000)

Der eintauchende Tropfen verdrängt in wenigen Millisekunden die Probenflüssigkeit nach allen Seiten. Ein Kraterloch entsteht, das sich schnell wieder schließt. Die vom Eintropfzentrum nach außen induzierten Strömungen führen zu morphologisch vielfältig gestalteten kleinen Wirbeln. Diese kommen für kurze Zeit annähernd zur Ruhe und werden 1,5 Sekunden nach dem Tropfenaufprall fotografiert, ehe sie zerfließen. Die fotografierten Bilder geben also nicht das Endstadium eines Gestaltungsprozesses wieder, sondern sind eine Momentaufnahme davon.

Beim wiederholten Aufprall des Tropfens entstehen jedes Mal neue Strömungsbilder. Vom vorangegangenen Strömungsbild bleiben zumeist verschwommene Reste, die in das neu entstehende Bild



integriert werden.

Abb. B: Strömungsbilder von Quellwasser der Stutzhofquelle als Beispiel und Referenz einer typischen vielgestalteten Entwicklungsreihe (s. u.), gezeigt ist das 1., 2., 5., 13., 21. und 31. Strömungsbild mit der Versuchsnummer

Verlauf des Versuchs

Die Strömungsbilder (=Tropfbilder) ergeben in der Folge der Tropfen eine Entwicklungsreihe von zunächst zarten, später meist üppig entfalteteten, rosettenartig angeordneten vielgestaltigen Bildern mit zahlreichen Wirbeln (Abb. B), die vom 1. bis 40. Tropfen fotografiert werden.

Bildelemente der Strömungsbilder

Im Laufe eines Versuches entwickeln sich durch die Anregungen der einfallenden Tropfen Strömungen in der Probenflüssigkeit, welche verschiedene Bildelemente entstehen lassen. Eine Übersicht über die Bereiche und Bezeichnungen des Strömungsbildes zeigt Abbildung C.

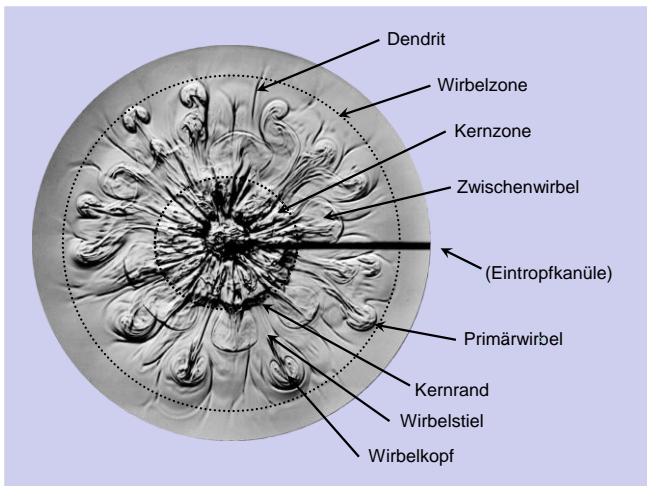


Abb. C: Wichtige Bildelemente eines vielgestaltigen Strömungsbildes (hier 17. Strömungsbild) mit ihren Bezeichnungen (der Bilddurchmesser entspricht im Versuch 5 cm)

a) Kernrand: Abgrenzung der Eintropfzone (Kerntyp)

In der Kernzone des Bildes entstehen unorganisierte chaotisch erscheinende Strömungsmuster. Der Kernrand ist bis etwa zum 10. Strömungsbild bei reinem Wasser scharf abgegrenzt. Die Kernzone macht im Versuchsverlauf eine Formverwandlung durch, die mit einer scharfen Abgrenzung zur Wirbelzone beginnt und bei höherer Tropfenzahl in eine Auflösung der Abgrenzung übergeht. Diese Formverwandlung verläuft in Abhängigkeit von der Probe unterschiedlich schnell mit zum Teil auch abweichenden Formelementen. Insbesondere der Verlust einer scharfen Abgrenzung des Kernrandes schon bei frühen Tropfenzahlen ist meistens ein Anzeichen für eine Belastung des Wassers mit organischen Verunreinigungen. Die unterschiedliche Abgrenzung des Kernrandes wird durch die Kerntypen 0 – 12 beschrieben. Kerntyp 12 z. B. besitzt eine scharfe, wulstförmige Abgrenzung umgeben von einem geschlossenem Ring von Kammern (sehr saubere Wasserprobe, siehe Abb. D, links), Kerntyp 3 besitzt eine verwaschene Kernzone mit aufgelöstem Rand (Abb. D, rechts). Die Bestimmung erfolgte jeweils beim 10. Strömungsbild.

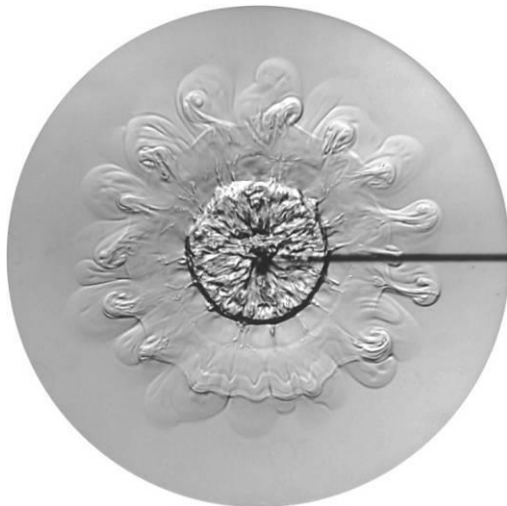
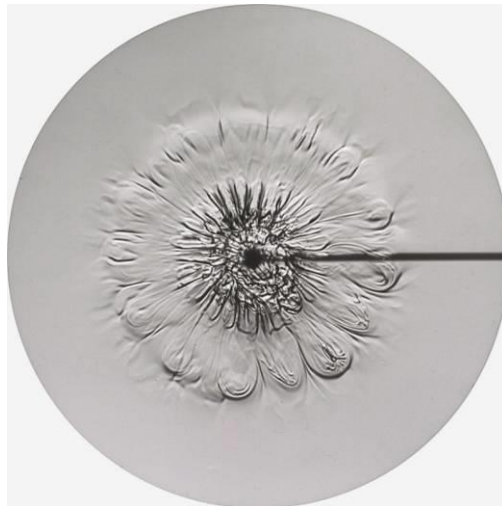


Abb.



D:

Beispiele für die Einteilung des Kerntyps, jeweils 10. Strömungsbild. Links: Kerntyp 12, rechts: Kerntyp 3

b) Die Wirbelzone

-Gestaltung der Strömungsformen

In der höchst empfindlichen Wirbelzone entstehen sehr sensible Strömungen durch das Begegnen von einfallendem Tropfen und Probenflüssigkeit. Diese Strömungen werden als vielgestaltige, differenzierte Strömungsformen sichtbar, zumeist als differenzierte Wirbelanordnungen. Diese zeigen Stadien von

fortschreitender Komplexität. Die Anwesenheit und Ausprägung der Strömungsformen bestimmt die **Gestaltung** der Strömungsbilder. Als **Formung** wird im Folgenden eine plastische Konturierung der im Versuch entstehenden Wirbelformen bezeichnet, bezogen auf den einzelnen Wirbel.

- Gliederung der Wirbelzone

Zwei verschiedene Wirbelarten gliedern das Bild: die so genannten, weiter außen liegenden **Primärwirbel** und die zwischen diesen liegenden **Zwischenwirbel**, welche morphologisch dem Kern zu entspringen scheinen und ohne Wirbelstiel sind. Die Primärwirbel und Zwischenwirbel sind Elemente der **Gliederung** des Strömungsbildes. Die Zahl der Primär- und Zwischenwirbel innerhalb eines Versuches (= **Primär- bzw. Zwischenwirbelsumme**) gibt an, inwieweit das Strömungsbild durch differenzierte Strömungen rhythmisch gegliedert wird.

- Dendriten

Kurz vor dem 20. Strömungsbild werden an den Rändern der sich auflösenden Wirbel linienartige Formen sichtbar. Sie vergrößern sich ab dem 30. Strömungsbild aus der Wirbelzone in die Bildperipherie hinein und verzweigen sich dabei büschelig oder bäumchenartig; daher werden sie Dendriten genannt. Anders als die immer neuen Wirbel bleiben sie von Tropfen zu Tropfen bestehen und vergrößern sich kontinuierlich weiter. Sie entstehen durch laminare Ausgleichsströmungen.²

Strömungsbewegungen des Wassers

Die im Labor während des Versuchs beobachtete Art der *Strömungsbewegungen* der sich im zeitlichen Verlauf bildenden und auflösenden Strömungsformen gibt Aufschluss über die Strömungsdynamik einer Wasserprobe. Ein Wasser kann sich rasch, vielfältig und dynamisch bewegend strömen und immer wieder neue Formen erzeugen. Dies ist z. B. bei naturbelassenen Quellen und Mineralwässern der Fall. Im Gegensatz dazu strömen Wässer, die belastet sind, träge, undifferenziert und passiv.

Entwicklungstypen der Strömungsbilder

Die Strömungsformen in der Wirbelzone zeigen je nach Wasserprobe ein Gesamtbild, welches durch die Art der Strömungen und ihre gegenseitige Beeinflussung, Durchdringung und Überlagerung entsteht.

- Beim vielgestaltigen Entwicklungstyp (Abb. E, links) ist die Wirbelzone vielfältig und differenziert strukturiert sowie im Versuchsverlauf durch immer wieder abwechslungsreich sich bildende Wirbel gekennzeichnet.
 - Beim einfachgestalteten Entwicklungstyp (Abb. E, Mitte) sind es mehr undifferenzierte, monoton ablaufende Entwicklungen, in denen zunehmend nur noch vereinfachte Wirbelformen auftreten.
 - Beim ringförmigen Entwicklungstyp (Abb. E, rechts) findet keine Entwicklung im Laufe des Versuchs statt. Eine Ausbildung von strukturierten Wirbeln ist in den Strömungsbildern nicht ersichtlich. Diese zeigen eine Abfolge von ringartigen Strukturen. Er tritt besonders bei stark organisch belasteten Wässern auf, z. B. bei Anwesenheit von Tensiden.
-



Abb. E: Entwicklungstyp der Strömungsbilder; links: Vielgestaltiger Entwicklungstyp (10. Strömungsbild), Mitte: Einfachgestalteter Entwicklungstyp (15. Strömungsbild), rechts: Ringförmiger Entwicklungstyp (15. Strömungsbild)

Auswertung und Auswertungskriterien

Grundlage der Auswertung von Versuchen zur Strömungsdynamik sind die im Strömungsbild aufgetretenen Formen und Gestaltungsmerkmale. Die jeweilige Ausgestaltung und Anordnung der Bildelemente in der Strömungsbildreihe sind wichtige Auswertungsmerkmale. Da jeder Versuch aus einer Reihe von 40 Strömungsbildern besteht, liegt den Versuchsbewertungen ein Gestaltungs- und Verwandlungsgeschehen in der Zeit zugrunde. Wenn aus Platzgründen hier je Versuch nur einige Strömungsbilder gezeigt werden können, so sind sie als typische Repräsentanten des Charakters des ganzen Versuches aufzufassen.³ Die Tropfbilduntersuchung jeder Probe wurde 5-mal durchgeführt um der natürlichen Streuung der Strömungsdynamik Rechnung zu tragen.

Bei der vorliegenden Untersuchung wurden folgende Eigenschaften der Tropfbilder ausgewertet, welche im weiteren Verlauf erläutert werden:

- **Kerntyp:** Bei reinem Trinkwasser sollte er den Wert 10 bis 12 haben.
- **Strömungsbewegung,**
- **Gestaltung der Strömungsformen,**
- **Gliederung der Wirbelzone** wird durch die Summe der ausgebildeten Wirbel (WS) bzw. Zwischenwirbel (ZWS) ausgedrückt

Kontrollen – Referenzwasser: Absicherung und Validierung

Zur Absicherung und Validierung der Laborbedingungen werden regelmäßig innerhalb einer Versuchsserie Versuche mit Aqua dest. als Probe verwendet. Als *Referenz* für die Untersuchungen wird Quellwasser der Stutzhofquelle bei jeder Tagesserie und im Vergleich zu den untersuchten Probenwässern untersucht.

Zum Verständnis der strömungsdynamischen Untersuchung sei auf folgendes hingewiesen: Die Strömungsvorgänge im Versuch werden vorrangig vom *Zusammenspiel* der strömungsphysikalischen Eigenschaften von Wasserprobe und Tropfwasser, insbesondere deren Oberflächenspannungen, Viskositäten und Dichten sowie dem Bewegungsimpuls des Tropfens bestimmt (*Smith 1975, Wilkens et al. 2000, Wilkens 2004*). Sie erweisen sich als ein außerordentlich komplexes Geschehen, das zahlreiche Instabilitäten durchläuft und dadurch sensibel auf feinste Unterschiede sowohl der verschiedenen Wässer als auch der äußeren Bedingungen anspricht. Letztere werden unter Standardbedingungen konstant gehalten und ermöglichen so eine sehr hohe Empfindlichkeit der Strömungsvorgänge; die einzelnen Parameter sind als Ensemble sorgfältig aufeinander abgestimmt (*Wilkens et al. 2000*).

³ Näheres zur Auswertung siehe Jacobi (2004), Picariello (2004), Wilkens et al. (2000).