



Praktische Anwendung von Wärme als Tracer zur Abflussmessung in kleinen Oberflächengewässern

Wolfgang Gossel¹

Eingegangen: 19. September 2023 / Überarbeitet: 19. März 2024 / Angenommen: 3. April 2024 / Online publiziert: 11. Juli 2024
© The Author(s) 2024

Zusammenfassung

Thermische Methoden können zur Abflussmessung an kleinen Fließgewässern eingesetzt werden. Hierbei wird Wärme als Impuls oder kontinuierlich eingebracht und als Tracer genutzt. Diese Methode reduziert den Einfluss auf das Gewässer auf ein Minimum. Bei Nutzung einer Wärmebildkamera können Bilder wie auch Videos zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeit und der Querdispersion im Gewässer genutzt werden. Durch die Multiplikation der Fließgeschwindigkeit mit dem Gewässerquerschnitt kann der Abfluss berechnet werden. Sowohl der theoretische Hintergrund als auch die praktische Ausführung für Kleingewässer werden im Detail und an einem Beispiel erläutert. Die Hinweise zur Ausrüstung können für eigene Feldversuche interessant sein.

Schlüsselwörter Abflussmessung · Wärmetracer · Tracer · Kleine Fließgewässer · Infrarotmessung

Practical application of heat as tracer for discharge measurements in open channels

Abstract

Thermal methods can be used for discharge measurements in open channels. Heat is used as tracer input in the flowing water either as a pulse or by continuous injection. This method minimizes the impact of measurements on the water body. A thermographic camera allows the use of pictures as well as videos for an analysis of flow velocity and transverse dispersion in the open channel. Discharge is calculated by multiplication of flow velocity with the flow cross-section area. The theoretical background as well as the practical setup for small runoff measurements are explained using examples. Information is provided about the equipment which can be useful for specific field tests.

Keywords Discharge measurement · Heat tracer · Tracer · Small creeks · Infrared measurement

Einleitung

Abflussmessungen für Oberflächengewässer werden standardisiert nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik durchgeführt, z. B. nach der „Pegelvorschrift“ (LAWA und BMV 1997) bzw. dem „Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch“ (LAWA 2018).

Die dort maßgeblichen Methoden können zur Kalibrierung weiterer Methoden genutzt werden, so auch selten eingesetzter thermischer Methoden. Thermische Methoden wurden bisher hauptsächlich im Grundwasser und in der hyporheischen Zone, dem Kontaktbereich zwischen Grund- und Oberflächenwasser, eingesetzt (Rau et al. 2014; Anibas 2012; Constantz 2008; Anderson 2005).

Ziel der thermischen Abflussmessungen ist insbesondere die Messung der mittleren Fließgeschwindigkeit im Gewässer. Durch die Multiplikation der Fließgeschwindigkeit mit dem Gewässerquerschnitt kann der Abfluss indirekt bestimmt werden. Bei Tracer-Methoden (z. B. Farbtracer-methoden) besteht darüber hinaus auch noch die Möglichkeit der Berechnung der transversalen Dispersion aus den Versuchsdaten (Käb 1992). Tracer-Methoden, mithin auch

✉ Wolfgang Gossel
wolfgang.gossel@geo.uni-halle.de

¹ Institut für Geowissenschaften und Geographie, Fachgebiet Angewandte Geologie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 3, 06120 Halle (Saale), Deutschland

Tab. 1 Vorteile und Limitierungen anderer Messmethoden im Vergleich zur thermischen Abflussmessung, verändert nach LAWA (2018)
Table 1 Advantages and limitations of other runoff measurement methods compared to the thermal method, modified after LAWA (2018)

Methode	Vorteile	Limitierungen	Dispersionsmessung
Schwimmkörper	Geringer Messaufwand, auch bei Hochwasser einsetzbar	Nur Stromfaden an Gewässeroberfläche, Beeinflussung/Fließbehinderung durch Verkrautung	Nicht möglich
Farbtracer	Große Spannweite von Abflüssen	Chemische Gewässerbeeinflussung, muss genehmigt werden, die Umweltverträglichkeit und die Wassergefährdungsklasse müssen ausgewiesen werden	Gut möglich, über zeitdiskrete Bilder oder Videoaufnahmen
Salztracer	Geringer Messaufwand	Chemische Gewässerbeeinflussung, muss je nach Größenordnung des Gewässers und Trinkwasserrelevanz genehmigt werden	Je nach eingesetzter Messauslage mehrere Leitfähigkeitsdetektoren/-messgeräte
Messwehre	Hoher Aufwand bei Einbau, geringer Messaufwand, sehr genaue Bestimmung	Starke Beeinflussung der Gewässerstruktur, lässt nur einen definierten Abflussbereich zu	Nicht möglich
Messflügel	Große Spannweite von Abflüssen	Hoher Aufwand durch mehrere Messungen im Profil, Störung des Gewässers durch Absetzen der Messstange und evtl. Betreten des Gewässers, Seilkrananlage bei größeren Fließgewässern notwendig, empfindliche Mechanik	Nur grobe Abschätzung durch Messung der Geschwindigkeitsverteilung im Profil möglich
Magnet. Induktiv	Große Spannweite von Abflüssen	Störanfällig durch Infrastruktur, mehrere Messungen im Profil notwendig, Störung durch Absetzen der Messstange und evtl. Betreten des Gewässers	Nur grobe Abschätzung durch Messung der Geschwindigkeitsverteilung im Profil möglich
Ultraschall	Hohe zeitliche und räumliche Auflösung	Nur bestimmte Gewässergeometrie, insbesondere gleichbleibende Wassertiefe, möglichst laminares Fließen, keine, die Ausbreitung akustischer Wellen störenden Gegenstände im Uferbereich	Nur grobe Abschätzung durch Messung der Geschwindigkeitsverteilung im Profil möglich
Gefäßmessung/ Auslitern	Geringer Messaufwand, exakte Bestimmung	Nur Gewässergeometrie, die eine vollständige Erfassung des Abflusses durch einen Überfall (z. B. Wehr, Rohrauslauf) erlaubt, nur geringe Abflüsse	Nicht möglich

thermische Methoden, können auch über die Verdünnung auf Basis einer Tracer-Durchgangskurve (Integrationsmethode) ausgewertet werden (LAWA 2018; Langguth and Voigt 2004; Käb 1992; Kilpatrick und Cobb 1985). Bei den thermischen Verfahren ist hierzu die ortskonkrete Messung der Temperatur notwendig. Eine Wärmebildkamera erzeugt jedoch nur relative Temperaturbilder zur Umgebungstemperatur und ist damit für die Verdünnungsmethode nur mit viel Aufwand auswertbar. Zu den Tracer-Methoden können auch die Particle-Imaging Methoden gezählt werden (Naves et al. 2021), die besondere Schwimmkörper gleicher Dichte wie Wasser benötigen, um mit dem Wasser transportiert zu werden. Bei Luftblasen mit großem Auftrieb liefern sie in Gewässern mit größerer Querschnittstiefe keine eindeutigen Ergebnisse (Naves et al. 2021). Eine ähnliche, deutlich aufwändigere und stark automatisierte Variante der Nutzung von Thermo-Bildern ist in Lin et al. (2018) beschrieben. Dort wird mit hochpräzisen Thermo-Kameras gearbeitet (geometrische Entzerrungen, Strahlengang-Kalibrierungen) und zusätzlich werden hochgenaue Trackingmethoden in der stark automatisierten Datenverarbeitung eingesetzt.

Jedoch können Abflussmessungen das untersuchte Gewässer in struktureller, physikalischer oder chemischer Hinsicht beeinflussen, wie in Tab. 1 und in der Übersicht in LAWA (2018) aufgeführt.

Wie in Tab. 1 mit der Übersicht zu den gewässerökologischen und technischen Vor- und Nachteilen verschiedener Arten der Abflussmessung gezeigt wird, kann die thermische Messung in Bezug auf Gewässerstruktur und Wasserqualität als gering belastend eingeordnet werden. Die hier vorgestellte Methode bezieht sich ausdrücklich auf die Abflussmessung in kleinen Oberflächengewässern.

Methodenbeschreibung

Um die Ausbreitung der Wärme im Oberflächengewässer zu bestimmen, sind eine Wärmequelle und eine geeignete Messmethode notwendig. Je nach praktischer Ausführung, sowohl des Wärmeeintrags (z. B. mit Tauchsieder oder Warmwasserzugabe) wie auch der Messmethode (nur Thermometer oder Wärmebildkamera), kann dabei die Strömung im Gewässer selbst beeinflusst werden.

Für die Versuchsauswertung ist daher die Art des Wärmeeintrags wichtig, wobei Wärme-Impulse von dauerhaften Wärmeeinträgen unterschieden werden. Bei einem Wärmeimpuls ist die Auswertung der Fließgeschwindigkeit (Quotient aus Weg und Zeit) besonders einfach, da lediglich der Fließweg und die Fließzeit des Temperaturmaximums bestimmt werden müssen. Bei einem dauerhaften Eintrag ist

die Verlagerung des Temperaturmaximums über die Fließzeit je nach technischer Ausstattung schwer zu identifizieren. Die longitudinale Dispersion wirkt sich in Form einer Ausbreitung der Wärmefahne aus, ist aber nicht mithilfe der Halbwertsbreite wie bei einem Wärme-Impuls oder bei der transversalen Dispersion (s. unten) zu berechnen, sondern kann nur über mathematische Ableitungsverfahren bestimmt werden, für die die Daten in sehr hoher zeitlicher Auflösung aufgenommen werden müssen.

Zur Berechnung des Abflusses muss zusätzlich zur Fließgeschwindigkeit auch der Abflussquerschnitt gemessen werden. Entsprechend LAWA (2018) wird hierzu die Gewässerbreite bestimmt. In Abhängigkeit von der Breite wird dann an mehreren Messpunkten die Gewässertiefe (Gewässeroberfläche minus Gewässersohle) gemessen, woraus sich dann geometrisch die Querschnittsfläche des Abflusses ermitteln lässt.

Die Wärmeverteilung im Gewässer kann zur Bestimmung der transversalen horizontalen Dispersivität und des Dispersionskoeffizienten genutzt werden. In der Praxis wird dies durch die verwendeten Gerätschaften limitiert, denn so erzeugt beispielsweise ein einfacher Tauchsieder nur einen geringen Temperaturgradienten. Bei einer künstlichen, externen, lokalen Temperaturerhöhung werden neben der Advektion (Fließen durch Druckgradienten) und Konvektion (Fließen durch Dichtegradienten) die Dispersion sowie die Wechselwirkung mit Atmosphäre und Gewässersohle zu einer Abkühlung führen, was sich auf die Bestimmung der Fließgeschwindigkeit weniger auswirkt als auf die Berechnung der Dispersion.

In einem ersten Ansatz kann die Dispersivität über die Halbwertsbreite nach dem Fick'schen Gesetz analog zur Diffusion berechnet werden, wobei für eine standardisierte Normalverteilung die Beziehung von Halbwertsbreite (FWHM) und der Standardabweichung σ gegeben ist durch:

$$\text{FWHM} = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} \approx 2,354\sigma \quad (1)$$

bzw.

$$\sigma \approx \text{FWHM}/2,354 \quad (2)$$

Aus σ und der Fließzeit t kann dann der Dispersionskoeffizient D berechnet werden:

$$D = \frac{\sigma^2}{2t} \quad (3)$$

Die Dispersivität α ergibt sich aus dem Dispersionskoeffizienten durch die Division durch die Fließgeschwindigkeit v_a :

$$\alpha = D/v_a \quad (4)$$

Geräte

Aufgabe der Methode ist die Messung des Abflusses fließender Oberflächengewässer. Für große Fließgewässer (z.B. Bundeswasserstraßen) gibt es die entsprechenden, meist fest installierten Messinstrumente an offiziell festgelegten Messpunkten der gewässerkundlichen Landesdienste (z.B. LHW 2024). Für diese großen Gewässer eignet sich die hier vorgestellte Methode praktisch nicht, da die einzutragenden Wärmemengen viel zu groß wären. Da die spezifische Wärmekapazität von Wasser bei $4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ liegt, sind für die Erhöhung der Temperatur von 1 l Wasser um 1 K etwa 1,2 Wh notwendig, was bereits dem Drittel der Kapazität einer handelsüblichen 1,5 V AA-Batterie (LR6) entspricht.

Gerade kleine Fließgewässer befinden sich meist in schlecht von Infrastruktur (Straßen, Stromversorgung) erschlossenen Gebieten und daher werden hier Geräte vorgestellt, die leicht an solche Messstellen zu transportieren sind. Diese werden im Folgenden exemplarisch vorgestellt, es sind durchaus sehr viele weitere Gerätschaftstypen denkbar.

Bei kleinen (ca. 20–50 cm breiten), flachen (ca. 5–10 cm tiefen) Gewässern bietet es sich an, einen Tauchsieder im Gewässer zu platzieren und zu festgelegten Messzeitpunkten die Temperaturverteilung im Gewässer aufzunehmen. Hierdurch gibt es kaum Beeinflussungen des Fließgeschehens, lediglich zu vernachlässigende Dichteunterschiede. Die Tauchsieder mit 12 V Spannung haben meist eine Nennleistung von 100–200 W, was für eine Stromversorgung aus einem Akkumulator Kapazitäten von mehreren 100 Wh voraussetzt und damit in der Größenordnung von Autobatterien (400–500 Wh) liegt. Bei Abflüssen größer 1 l/s können mit solch kleinen Tauchsiedern daher nur geringe Temperaturerhöhungen von wenigen K erreicht werden, die mit üblichen Thermometern nicht mehr gut erfasst werden können.

Bei größeren Fließgewässern (Abfluss größer ca. 10 l/s) reicht die Leistung dieser Tauchsieder jedoch nicht mehr aus. In diesem Fall kann z. B. mit einer Zugabe von heißem Wasser gearbeitet werden, solange die Menge des zugegebenen Wassers gering (etwa 10%) gegenüber dem zu messenden Abfluss ist, denn das zugegebene Wasser stellt einen künstlichen Zustrom dar. Durch diese Zugabe ergibt sich eine Veränderung der Strömungsverhältnisse, die bei der Berechnung des Abflusses berücksichtigt werden muss, indem sie abgezogen wird, um den tatsächlichen Gewässerabfluss zu erhalten. Hierfür müssen die Menge des zugegebenen heißen Wassers und die Zeitspanne der Zugabe bekannt sein bzw. gemessen werden.

Zur Messung der Wärmeausbreitung könnte ein gewöhnliches Thermometer verwendet werden, jedoch sind die üblichen Quecksilber- oder Alkohol-Thermometer deutlich zu träge. Punktuell messende Infrarot-Thermometer weisen

kürzere Ansprechzeiten auf und können somit vergleichbar mit Leitfähigkeits-Messungen von Salztracern für die Temperaturmessungen des thermischen Tracers eingesetzt werden. Damit werden auch die Verdünnungsmethode und die Integrationsmethode der Tracerverfahren im Gelände ohne chemische Beeinflussung des Gewässers verfügbar.

Im Gelände können weiterhin z. B. spezielle Infrarotkameras eingesetzt werden, die durch die Bild- oder Video-Erfassung der vollständigen Fließstrecke, der Fließzeit und der vollständigen Gewässerbreite auch die Auswertung der horizontalen Querdispersion ermöglichen. Forward-Looking Infrarot-Kameras (FLIR), wie sie als Aufsätze für Mobiltelefone, Digitalkameras, Tablets etc. erhältlich sind, bieten beispielsweise ebenfalls sehr gute Analysemöglichkeiten in der maßstäblichen Auswertung von Fließstrecken und Querschnittsbreiten. Die jeweiligen Geräte sind meist auch robust und im Gelände leicht einsetzbar.

Da die Temperatur – anders als die Konzentration von Farbstoffen – neben der Verdünnung auch durch (zeitabhängige) Abkühlung gesenkt wird, ist die Methode meist nur für kurze Versuchsstrecken von 0,5–2 m geeignet.

Das hier vorgestellte Verfahren wurde an einem kleinen Gewässer erprobt, indem mit einem 12V-Tauchsieder, 150 W sowie einer FLIR-Wärmebildkamera in einem Mobiltelefon gearbeitet wurde. Der an einen tragbaren Akku angeschlossene Tauchsieder erforderte etwa fünf Minuten, um seine volle Temperatur zu erreichen. Zur besseren Auswertung der Infrarotbilder wurde eine Messlatte direkt neben das Kleingewässer gelegt, sodass direkt die Fließstrecke und über den Maßstab die transversale Ausbreitung bestimmt werden konnten. Das Mobiltelefon wurde auf einen vertikalen Abstand von etwa 1,5 m zum Gewässer positioniert, um die Messlatte, die gesamte Gewässerbreite und die Wärmeausbreitung längs und quer zur Fließrichtung erfassen zu können. Dies ist für jeden Messpunkt anzupassen. Selfie-Stangen können bei Mobiltelefonen hilfreich sein, evtl. auch ein Stativ, wenn der Versuch nur von einer Person durchgeführt wird.

Leider sind FLIR-Kameras von Mobiltelefonen meist weder absolut kalibriert noch können sie die Temperaturdifferenzen sehr genau wiedergeben, sodass die Temperaturbilder nur die für den Aufnahmezeitpunkt und die Umgebung relativen Temperaturdifferenzen in Farben anzeigen. Dies reicht jedoch für die Bestimmung des Temperaturmaximums zum Aufnahmezeitpunkt und zur Abschätzung der Halbwertsbreite, womit sowohl die mittlere Fließgeschwindigkeit als auch die Querdispersion berechnet werden können.

Praktische Versuchsdurchführung

Im Gelände ist die Auswahl eines Gewässerabschnitts von 2–5 m Länge hilfreich, der möglichst gerade verläuft. Neben dem Gewässer sollte, wie oben beschrieben, eine gut ablesbare Messlatte (am besten Nivellierlatte aus der Vermessung) gelegt werden, um diesen Maßstab sowohl für die Bemessung der Ausbreitung der Wärmefahne zu verschiedenen Zeitpunkten als auch die Bemessung der Gewässerbreite nutzen zu können. Entsprechend sollte die Aufnahmekamera mittig zu diesem Gewässerabschnitt platziert werden, um mögliche Verzerrungen durch Schräg-Aufnahmen zu vermeiden. Bei nur einer Messperson sollte ein Stativ für die richtige Platzierung der Kamera genutzt werden. Wenn mehrere Personen die Messung begleiten, können auch die absoluten Temperaturen parallel mit einem Infrarot-Messgerät bestimmt werden. Letzteres ist nicht zwangsläufig nötig, denn die Bestimmung der Fließgeschwindigkeit und mittelbar auch des Abflusses erfolgt über das relative Temperaturspektrum in der Wärmefahne. Die Verschiebung des Temperaturspektrums während der Aufnahme spielt hierfür keine Rolle. Die Wahl des Wärmeeintrags hängt, wie oben dargestellt, ganz wesentlich vom Abfluss ab: Bei geringen Abflüssen $< 1 \text{ l/s}$ kann mit kleinen Tauchsiedern für eine 12 V Stromversorgung gearbeitet werden. Bei größeren Abflüssen ist die Zugabe von heißem Wasser sinnvoller. Der Tauchsieder braucht vor dem Eintauchen meist einige Minuten, um sich auf geeignete Temperaturen zu erhitzen.

Für die Messung können je nach Umgebung und Wassertemperatur bereits 2–3 K Temperaturerhöhung gut auswertbar sein. Ein kurzer Wärmeeintrag über 1–2 s ist zu bevorzugen, da dann die Ausbreitung besonders gut sichtbar wird. Wenn die Wärmeausbreitung aufgrund zu geringer Temperaturunterschiede zum Rest des Wasserkörpers nicht in ausreichendem Maße sichtbar wird, müssen ggf. zwei oder mehr Versuche durchgeführt werden. Aufgrund der kurzen Versuchsdauer von nur wenigen Sekunden stellt dies bei den kurzfristigen Wärmeeinträgen für die Stromversorgung meist kein Problem dar.

Für die Datenerfassung eignen sich Filme besonders gut, da dann die Ausbreitung samt Verwirbelungen sehr gut beobachtet und nachträglich ausgewertet werden kann. Wenn der Maßstab vorhanden und im Bild oder Video erfasst wird, muss zudem die Gewässertiefe gemessen werden, was auf verschiedene Methoden (z. B. mit Messlatte, Gliedermaßstab oder Ultraschall) leicht durchgeführt werden kann, aber zeitnah zum weiteren Versuch geschehen sollte. Um den Umriss des Gewässers und eine sehr schnelle und leichte Bemessung der Gewässerbreite ermitteln zu können, sollte ein Foto mit einer Standardkamera aufgenommen werden.

Der leicht und schnell durchzuführende Versuch kann im Gelände bereits überschlägig ausgewertet werden und

es bietet sich auch eine mehrfache Wiederholung innerhalb eines kurzen Zeitraums an, um die Variationsbreite der Ergebnisse abschätzen zu können.

Ergebnisse

In der hier vorgestellten praktischen Anwendung erfolgten die Abflussmessungen an einem kleinen, intermittierenden Gewässer (Hechtgraben in Halle (Saale), Koordinaten 51,5108°N; 11,8998°E) an unterschiedlichen Punkten zu unterschiedlichen Zeiten, um die Praktikabilität der Methode zu testen. Es wurden Versuche an zwei Tagen (06.08.2023 und 08.08.2023) an leicht unterschiedlichen Gewässerabschnitten unter deutlich unterschiedlichen Abflussbedingungen durchgeführt, von denen am 08.08.2023 die Auswertung der Querdispersion wegen zu geringer Gewässertiefe und instantaner vollständiger Durchmischung nicht möglich war. In Abb. 1 sind zwei mit einem Mobiltelefon aufgenommene Wärmebilder eines Dauereintrags

über einen Tauchsieder zu sehen. Das Gewässer ist recht klein, der Abfluss wurde auf etwa 0,31/s bestimmt. Die Versuche wurden im Abstand von wenigen Minuten durchgeführt, sodass quasi-stationäre Bedingungen angenommen werden können. Visuell haben sich ebenfalls keine deutlichen Veränderungen wie z.B. Wasserstandsänderungen gezeigt. Auch Salztracer-Versuche wurden in sehr kurzem zeitlichem Abstand zu den thermischen Experimenten durchgeführt, sodass die Abweichungen ebenfalls nicht auf größere äußere Beeinflussungen durch veränderte hydrologische Abflussbedingungen zurückzuführen sind. Der in Tab. 2 zusätzlich dokumentierte Versuch am 08.08.2023 wurde an anderer Stelle und unter anderen Bedingungen durchgeführt (Regenereignis am 07.08.2023).

Die Auswertung dieses Wärmeeintrags (s. Tab. 2) erlaubt die Ermittlung der Querdispersivität mit einem Wert von etwa 8 mm, was angesichts der Strömungsgeschwindigkeit und des kleinen Fließquerschnitts plausibel ist.

Die Ergebnisse der Wärmetracer-Methode wurden mit denen von Salztracern verglichen und weisen nur geringe

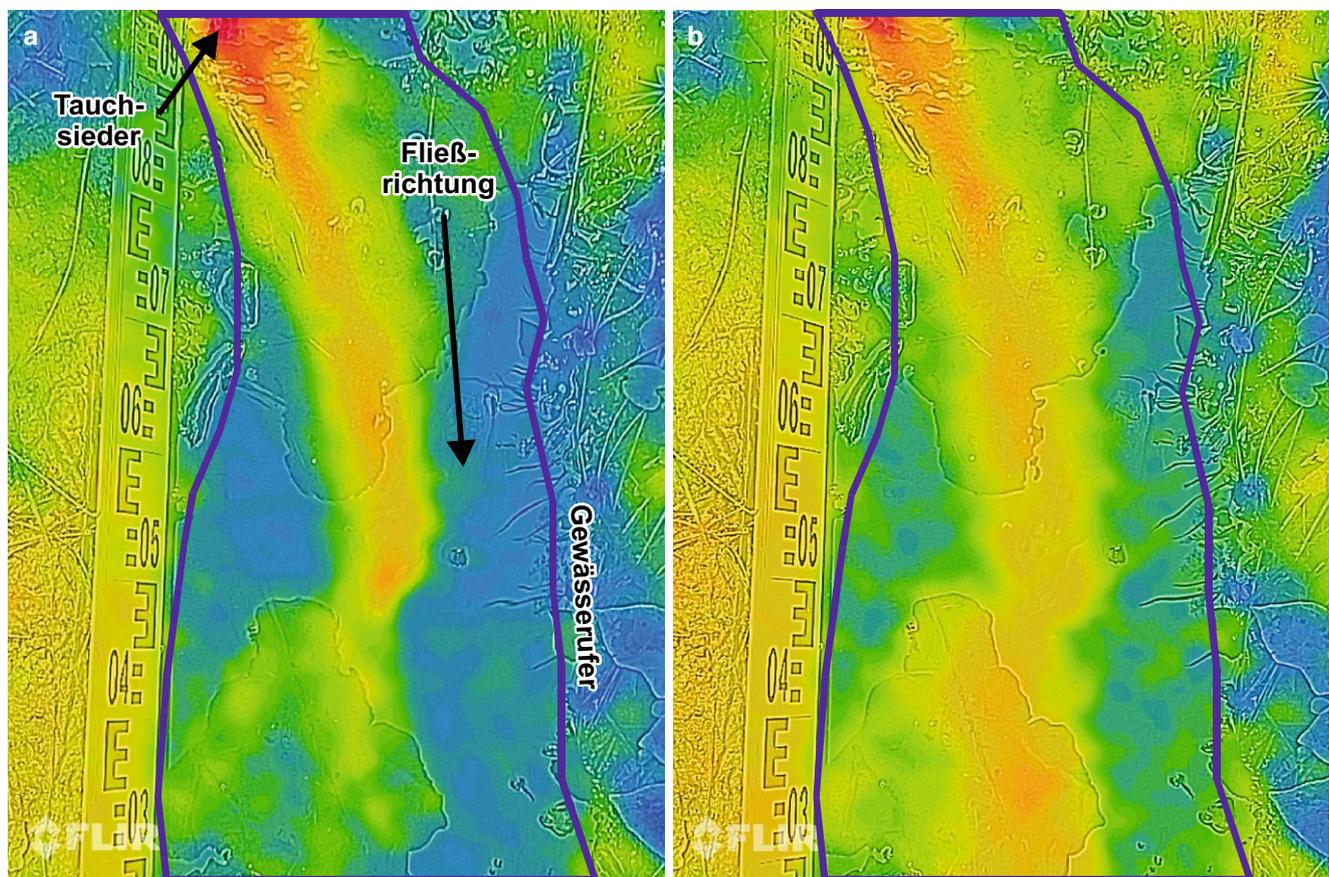


Abb. 1 Thermobilder (FLIR) eines Mobiltelefons zur Bestimmung von Fließgeschwindigkeit und Querdispersion des Hechtgrabens in Halle (Saale). Wärmequelle ist ein batteriebetriebener Tauchsieder (12 V, 150 W) mit Dauereintrag. Bild **a** wurde nach 2 s (Experiment Nr. 1), Bild **b** nach 7 s (Experiment Nr. 2) aufgenommen. Der Gewässerumriss ist mit einer *blauen Umrandung* markiert

Fig. 1 Thermo images (FLIR) of a mobile phone for the measurement of flow velocity and transversal dispersion of the „Hechtgraben“ in Halle (Saale). Heat source is a battery driven immersion heater (12 V, 150 W) with permanent thermal input. Image **a** was recorded after 2 s (Experiment Nr. 1), image **b** after 7 s (Experiment Nr. 2). The shape of the creek is marked with a *blue line*

Tab. 2 Ergebnisse der Abflussmessungen im Hechtgraben in Halle (Saale), die Fließlängenangaben „Von [m]“ und „Bis [m]“ beziehen sich auf die in Abb. 1 sichtbare Messlatte

Table 2 Results of discharge measurements at the „Hechtgraben“ in Halle (Saale), the flow length documentation „Von [m]“ and „Bis [m]“ refers to the measuring rod in Abb. 1

Experiment Nr.	Datum	Tracer/-methode	Zeit [s]	Von [m]	Bis [m]	Fließgeschwindigkeit [m/s]	Abfluss [m ³ /s]	Querdispersionskoeffizient [cm ² /s]	Transverse Dispersion [m]
1	06.08.2023	Tauchsieder	2	0,88	0,5	0,19	0,00076	0,078	4,09E-3
2	06.08.2023	Tauchsieder	7	0,88	0,25	0,09	0,00036	0,075	8,29E-3
3	06.08.2023	Salz	27	0	2	0,07	0,00030	–	–
4	06.08.2023	Salz	36	0	2	0,06	0,00022	–	–
5	08.08.2023	Heißes Wasser	13	0	2	0,15	0,00062	–	–
6	08.08.2023	Tauchsieder	3	0	0,3	0,10	0,00040	–	–
7	08.08.2023	Salz	15	0	2	0,13	0,00053	–	–
8	08.08.2023	Salz	16	0	2	0,13	0,00050	–	–

Differenzen auf, wie Tab. 2 zeigt. Die Salztracer-Methode konnte über eine längere Fließstrecke ausgeführt werden, da die Gradienten der elektrischen Leitfähigkeiten des Tracers zum umgebenden Wasser hier größer waren als die Temperaturgradienten des Temperaturtracers.

Diskussion und Schlussfolgerung

Die Methode zur thermischen Abflussmessung ist mit heutigen Wärmebild-Verfahren sehr schnell und einfach in kleinen Fließgewässern durchzuführen und erlaubt nach Ermittlung des lokalen Gewässer-Querschnitts neben der Bestimmung der Fließgeschwindigkeit und des Abflusses auch die Bestimmung der Dispersion. Durch die sehr einfache Geräte- und Versuchsanordnung sowie eine standardisierte und ebenfalls sehr einfache Auswertung ist das Ziel des Versuchs unkompliziert erreichbar. Wie die Testmessungen an den ersten beiden Versuchen am 06.08.2023 jedoch deutlich zeigen, wurden bei sehr kurzen Fließstrecken und -zeiten zu hohe Fließgeschwindigkeiten ermittelt. Hierdurch werden auch die Dispersivitäten unterschätzt, weil die Fließgeschwindigkeit reziprok in die Berechnungen eingeht (Tab. 2).

Hervorzuheben und empfohlen ist zudem die Nutzung von Filmaufzeichnungen. Hierdurch wird nicht nur ein besserer visueller Eindruck der Wärmeverteilung geschaffen, sondern es können auch Turbulenzen und Stillwasserbereiche schneller und sicherer identifiziert werden.

Die bevorzugten Einsatzbereiche der vorgestellten Methode bei Nutzung von Tauchsiedern liegen bei kleinen Gewässern mit Abflüssen kleiner 1 l/s. Dabei ist die Methode unabhängig von der Gewässergeomorphologie und kann auch bei sehr flachen Gewässern mit <5 cm Wassertiefe gut eingesetzt werden. Die Zugabe von heißem Wasser verbessert zwar die Visualisierungsmöglichkeit, verändert aber die Strömung, was bei der Auswertung berücksichtigt werden

muss und mit zusätzlichem Messaufwand verbunden ist. Bevorzugt sollten daher bei den thermischen Abflussmessungen Tauchsieder eingesetzt werden. Bei Berücksichtigung des zusätzlichen Abflusses durch Zugabe von heißem Wasser erweitert sich jedoch der Einsatzbereich deutlich auf Gewässer mit Abflüssen kleiner etwa 100 l/s bei Zugabe von wenigen hundert ml/s bis wenigen l/s Wasser mit um etwa 10–20 K erhöhten Temperaturen.

Die Bestimmung der Querdispersivität über die Halbwertsbreite geht von weitgehend laminarem Fließen aus. Turbulentes Fließen im kleinen Graben wird hierbei vernachlässigt. Auch bei mäandrierenden Gewässern ergeben sich Turbulenzen, die höchstens näherungsweise über die Dispersion beschrieben werden können.

Zudem beansprucht die hier vorgestellte Methode das Gewässer nur minimal: Erstens gibt es keine hydrochemische Belastung wie bei Salz- oder Farbtracern, zweitens wird die Struktur des Gewässers nicht tangiert, wie es beispielsweise beim Einbau von Messwehren der Fall ist, und drittens ist die physikalische Beeinflussung durch die kleinräumige und nicht weit reichende Ausbreitung der Wärmefahne vernachlässigbar. Der technische Aufwand ist begrenzt, weil die sehr mobilen Messungen schnell durchführbar sind und einen geringen apparativen Aufwand benötigen, für den robuste Geräte verfügbar sind. Der Einsatz der Methode ist jedoch auf kleine Fließgewässer begrenzt.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Interessenkonflikt W. Gossel gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Anderson, M.P.: Heat as a ground water tracer. *Ground Water* **43**(6), 951–968 (2005). <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>
- Anibas, C.: Heat as a tracer for groundwater-surface water interaction. Vrije Universiteit, Brussel (2012). PhD thesis
- Constantz, J.: Heat as a tracer to determine streambed water exchanges. *Water Res Res* **44**, 1–20 (2008). <https://doi.org/10.1029/2008WR006996>
- Käß, W.: Geohydrologische Markierungstechnik – Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 9. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart (1992). 519 S
- Kilpatrick, F.A., Cobb, E.D.: Measurement of discharge using tracers. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 3. USGS (1985). 52 S
- Langguth, H.-R., Voigt, R.: *Hydrogeologische Methoden*, 2. Aufl. Springer, Berlin (2004)
- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser): Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch. Kulturbuchverlag Berlin, Berlin (2018). 160 S
- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser), BMV (Bundesministerium für Verkehr): Pegelvorschrift. Kulturbuchverlag Berlin, Berlin (1997). 106 S
- LHW (Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt): Pegel Wasserstand/Durchfluss (2024). <https://gld.lhw-sachsen-anhalt.de/>
- Lin, D., Eltner, A., Sardemann, H., Maas, H.-G.: Automatic spatio-temporal flow velocity measurement in small rivers using thermal image sequences. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote. Sens. Spatial Inf. Sci.* **4-2**, 201–208 (2018)
- Naves, J., García, J.T., Puertas, J., Anta, J.: Assessing different imaging velocimetry techniques to measure shallow runoff velocities during rain events using an urban drainage physical model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **25**, 885–900 (2021). <https://doi.org/10.5194/hess-25-885-2021>
- Rau, G.C., Andersen, M.S., McCallum, A.M., Roshan, H., Acworth, R.I.: Heat as a tracer to quantify water flow in near-surface sediments. *Earth Sci Rev.* **129**, 40–58 (2014)

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.