



Physik

Untersuchung des Mpemba-Effekts

Eine systematische Analyse des Gefrierverhaltens von Wasser

Seit Erasto B. Mpemba 1963 das schnellere Gefrieren von warmem Wasser beschrieb, wird die Existenz dieses Effekts in der Wissenschaft kontrovers diskutiert. Im Rahmen einer vierjährigen Forschungsarbeit wurde das Phänomen systematisch überprüft. Die gewonnenen experimentellen und theoretischen Daten liefern jedoch keine wissenschaftlich begründete Evidenz für den Effekt.

DIE JUNGFORSCHER*INNEN



© Stiftung Jugend forscht e.V.

**Yuanzhen Sun (19),
Lucia L. S. Krause (18),
Branko Ivanić (19)**
Goetheschule Neu-Isenburg

Eingang der Arbeit:
8.9.2025

Arbeit angenommen:
22.5.2026



Untersuchung des Mpemba-Effekts

Eine systematische Analyse des Gefrierverhaltens von Wasser

1. Einleitung

Erasto Mpemba machte 1963 die Beobachtung, dass warmes Wasser im direkten Vergleich zu kaltem schneller gefriert [\[1\]](#). Doch bereits seit der Antike wurde das Phänomen beschrieben. Trotz umfangreicher Forschung konnte bislang keine vollständige Erklärung für den Mpemba-Effekt gefunden werden. Die größte Problematik liegt dabei in der umstrittenen Definition und den Bedingungen des Effektes. Zum einen wird das schnellere Erreichen von 0°C als Kriterium für den Effekt herangezogen [\[15\]](#), zum anderen das schnellere Gefrieren von wärmerem Wasser unter denselben Bedingungen [\[11\]](#). In dieser Arbeit wird die Letztere verwendet.

2. Forschungsstand

Im Laufe der Jahrhunderte wurden zahlreiche Hypothesen zur Erklärung des Mpemba-Effekts entwickelt. Zu den meist genannten Ansätzen in der Literatur zählen:

Im wärmeren Wasser findet durch den größeren Temperaturgradienten eine schnellere Konvektion statt, was zu einer schnelleren Abgabe von Wärme an die Umgebung führt [\[3\]](#) [\[15\]](#).

Im wärmeren Wasser gibt es weniger gelöste Gase. Dadurch gibt es weniger Widerstand bei der Konvektion, was den Gefrierprozess beschleunigt [\[2\]](#)[\[16\]](#).

Der Volumen- und Massenverlust durch Verdunstung führt zu einer reduzierten Wassermenge. Dadurch benötigt das wärmere Wasser aufgrund der höheren Rate der Verdunstung weniger Energie zum Abkühlen, wodurch der Gefrierprozess beschleunigt wird [\[3\]](#)[\[15\]](#).

Durch die höhere Bewegungsenergie der Moleküle im wärmeren Wasser hat dies eine höhere Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Moleküle sich in der Kristallstruktur des Eises anordnen, wodurch ein früheres Gefrieren geschehen kann [\[17\]](#).

Die unterschiedlich vorhandenen Kristallisationskeime haben einen Einfluss darauf, wie stark das Wasser unterkühlt wird. Hierbei handelt es sich um Unreinheiten oder mechanische Erschütterungen, die für die Eisbildung entscheidend ist und z. B. die Gefrierzeit von hochreinem Wasser verlängern kann [\[2\]](#)[\[7\]](#).

Um die Gefäße können sich isolierende Eisschichten bilden. Das Gefäß mit dem wärmeren Wasser kann die Eisschicht schmelzen und durch die Schmelzwärme und das Fehlen dieser Isolationsschicht mehr Wärme abgeben [\[9\]](#)[\[12\]](#).

Diese Hypothesen sind allerdings umstritten, weshalb eine einheitliche wissenschaftliche Erklärung bislang fehlt. Während einige der genannten Ansätze durch experimentelle Befunde gestützt werden, existieren ebenso widersprüchliche Resultate. Letztere deuten darauf hin, dass das Phänomen womöglich von weiteren, oft unberücksichtigten Faktoren beeinflusst wird.

3. Experimentelles Vorgehen

Die experimentelle Untersuchung zielt darauf ab, den Mpemba-Effekt zu überprüfen, potentielle Einflussfaktoren zu identifizieren und den Gefrierprozess von Wasser unter verschiedenen Bedingungen systematisch zu analysieren. Insbesondere werden die oben genannten Hypothesen untersucht. Das methodische Vorgehen entwickelte sich dabei schrittweise von einer manuellen Versuchsdurchführung und Datenerfassung hin zu einem automatisierten Versuchs-

Tab. 1: Temperaturleitzahl der verwendeten Gefäße

Gefäß	α in $\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$
DURAN-Bechergläser	0,67 [42]
Einmachglas (Kalk-Natron-Glas)	0,63 [43]
Polystyrol-Becher	0,09 [44]

aufbau, der eine präzisere und umfassendere Erfassung von Messdaten ermöglichte.

3.1 Versuchsreihen

Um das oben genannte Ziel des experimentellen Teils zu erreichen, wurde über vier Jahren hinweg eine Vielzahl an unterschiedlichen Versuchsreihen durchgeführt. Bei jedem Versuch gefror das Wasser unter der Variation von maximal einem Parameter. Sofern nicht explizit erwähnt, wurden die Versuche mit einem Thermometer des Typs DS18B20 (gerätebedingte Unsicherheit von $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$) pro Gefäß durchgeführt.

Die am häufigsten durchgeführte Versuchsreihe war die Variation der Starttemperatur. Dies hatte die Zielsetzung, den Mpemba-Effekt allgemein nachzuweisen. Diese Untersuchungen wurden auf zwei Arten vollzogen: Zum einen wurden warmes und kaltes Wasser parallel eingefroren, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Zum anderen wurden in einem Durchlauf mehrere Gefäße mit identischer Starttemperatur untersucht. Letzteres dient üblicherweise dazu, systematische Fehler zu minimieren, und wurde insbesondere beim automatisierten Versuchsaufbau (s. Kapitel 3.2) durchgeführt.

Um die Auswirkung der Verdunstung, die am häufigsten genannte Ursache des Mpemba-Effekts, zu untersuchen, wurden Gefäße mittels Küchenfolie luftdicht verschlossen. Eine Methode, um das verdunstete Wasser im Gefäß zurückzuhalten, sodass es dort kondensieren kann. Andererseits wurde der volumenmindernde Effekt der Verdunstung durch eine gezielte Variation der Ausgangsvolumina simuliert. Solche Versuche wurden in Polystyrol-Bechern mit einem Nennvolumen von 250 ml durchgeführt, welche mit unterschiedlichen Wassermengen (190 ml, 200 ml und 210 ml) bei identischer Starttemperatur befüllt wurden.

Für die Untersuchung der Rolle gelöster Gase wurde Leitungswasser verwendet und auf einer Heizplatte mit integriertem Magnetrührer erhitzt. Durch das kontinuierliche Rühren wurde die Oberfläche des heißen Wassers in Bewegung gehalten, um das Entweichen der gelösten Gase zu verzögern und eine künstliche Durchmischung aufrechtzuerhalten.

ten. Das auf diese Weise erhitzte Wasser mit einem höheren Gasanteil wurde mit Wasser, das in einem haushaltsüblichen Wasserkocher erhitzt worden war, verglichen. Zudem wurde das Gefrierverhalten vom Leitungswasser bei Raumtemperatur mit thermisch entgastem Wasser verglichen. Letzteres wurde abgekocht und unmittelbar danach mit einer Küchenfolie versiegelt, die als eine mechanische Diffusionsbarriere beim Abkühlen auf Raumtemperatur diente und gleichzeitig ausreichend dehnbar für den Druckausgleich war. Diese beiden Vergleiche ermöglichten – zu für schulische Verhältnisse erschwinglichen Kosten – die qualitative Überprüfung der Auswirkung durch gelöste Gase. Auf den Einsatz von hochreinem deionisiertem oder bidestilliertem Wasser konnte so verzichtet werden.

In einem Versuch jedoch verwendeten wir einfaches destilliertes Wasser, um dessen Gefrierprozess mit dem des Leitungswassers zu vergleichen. Warum dieser Versuch abgebrochen wurde, wird im weiteren Verlauf näher erläutert.

Ferner wurde der Einfluss externer Magnetfelder auf den Gefrierprozess von Wasser untersucht. Hierzu kamen starke Permanent- und Elektromagnete zum Einsatz, um eine potenziell Beeinflussung der molekularen Dynamik oder der Keimbildung im Wasser zu überprüfen. Die Positionierung der Magneten erfolgte entweder unterhalb des Gefäßes für ein einseitig gerichtetes Magnetfeld oder an den gegenüberliegenden Seitenwänden für ein möglichst homogenes Feld.

Darüber hinaus wurde der Einfluss der Gefäßgeometrie sowie des Gefäßmaterials auf das Abkühlverhalten untersucht. Hierzu kamen in den verschiedenen Versuchsreihen DURAN-Bechergläser mit 50 ml, 250 ml und 500 ml zum Einsatz. Ergänzend wurden die erwähnten Polystyrol-Plastikbecher (250 ml) sowie ein Einmachglas mit einem Volumen von 10 l verwendet.

Die für die Wärmeleitung entscheidende mittlere Temperaturleitzahl der Gefäße

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

ist in [Tab. 1](#) gelistet, wobei λ die Wärmeleitfähigkeit, ρ die Dichte und c die spezifische Wärmekapazität ist.

In den 500-ml-Bechergläsern wurden außerdem vier Temperatursensoren mithilfe einer eigens angefertigten Fixierung positioniert. Unter Ausnutzung der Rotationssymmetrie des zylindrischen Gefäßes beschränkt sich die Messung auf eine einzelne, vertikale Ebene in einer Gefäßhälfte. Innerhalb dieser Ebene sind die Sensoren in Form einer 2×2-Matrix angeordnet. Die Positionen verteilen sich dabei auf zwei Radien sowie zwei Füllhöhen, was eine systematische Erfassung des Temperaturgradienten ermöglicht (s. [Abb. 1](#)). Zwecks Visua-

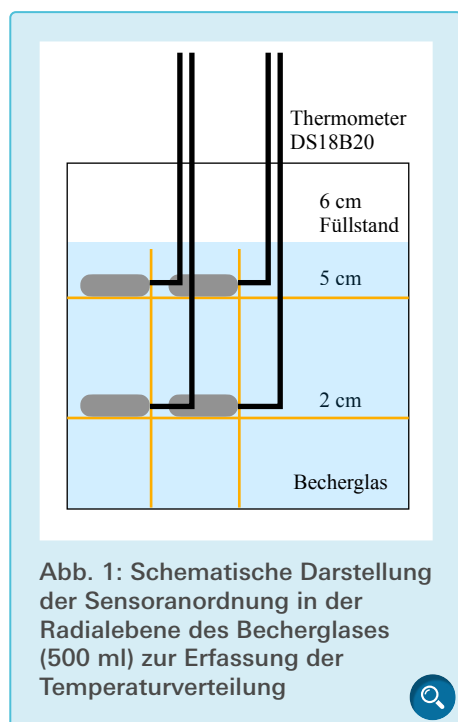


Abb. 1: Schematische Darstellung der Sensoranordnung in der Radialebene des Becherglases (500 ml) zur Erfassung der Temperaturverteilung

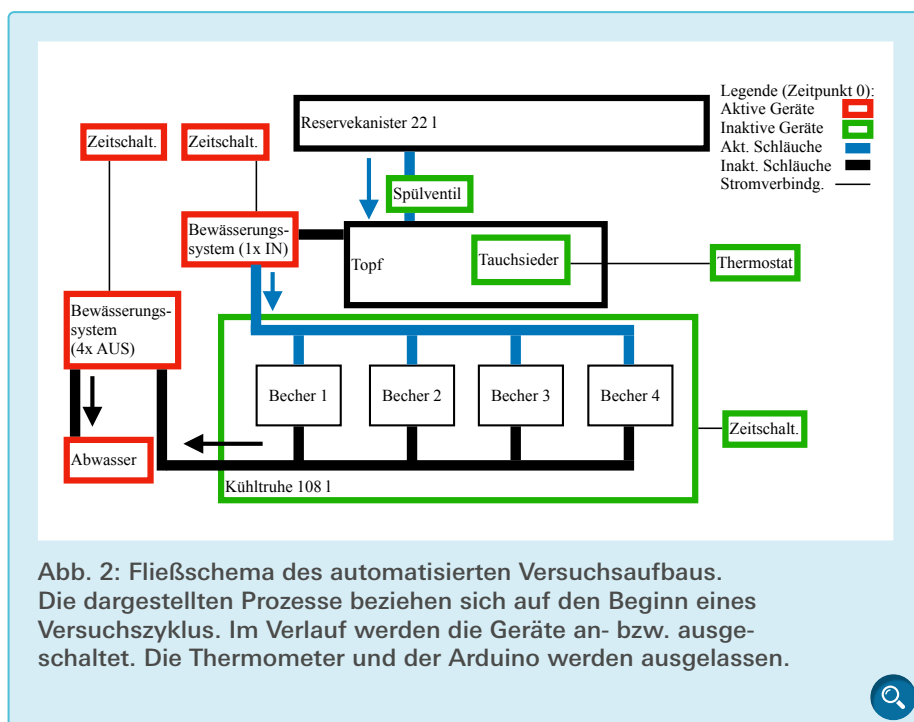


Abb. 2: Fließschema des automatisierten Versuchsaufbaus. Die dargestellten Prozesse beziehen sich auf den Beginn eines Versuchszyklus. Im Verlauf werden die Geräte an- bzw. ausgeschaltet. Die Thermometer und der Arduino werden ausgelassen.

lisierung wurden die gemessenen Datenpunkte anschließend in einem zweidimensionalen Gitter interpoliert.

Alle thermometrischen Messdaten wurden auf einen Computer übertragen. Mithilfe eines eigenen Python-Programms können aus den Rohdateien die Messdaten extrahiert und damit Graphen erstellt werden.

3.2 Methodik

Die Messmethodik wurde kontinuierlich optimiert. Während die Messung der Temperaturen anfangs über LCD-Kabelthermometer erfolgte und die Daten manuell digitalisiert wurden, zeichnet seit 2022 ein Arduino-Mikrocontroller die Daten automatisiert über fünf Temperatursensoren auf eine SD-Karte auf.

Ab 2023 wurde der Versuchsaufbau schrittweise vollautomatisiert (vgl. [Abb. 2](#)): Ein Tauchsieder regelt mittels eines Thermostats die Wassertemperatur in einem Topf, aus dem die Becher befüllt werden. Das Befüllen des Heiztopfs erfolgt hydrostatisch aus einem Kanister mechanisch über ein Schwimmerventil, sodass sich der personelle Aufwand auf das Auffüllen des Kanisters reduziert. Die Kühltruhe mit 209 Litern von GGM Gastro und Pumpen (Bewässerungssysteme für Gartenbau) werden dabei über zeitgeschaltete Steckdosen gesteuert. Der kontinuierliche Betrieb ermöglicht eine signifikant höhere Anzahl an Messzyklen, was die statistische Belastbarkeit steigert.

Die Umgebungsbedingungen sollen möglichst konstant gehalten werden, da der Mpemba-Effekt über das Gefrieren unter identischen Ausgangsbedingungen definiert ist. Als Stell-

fläche für die Becher wurde hierzu ein Leichtmetalltablett verwendet, um eine möglichst homogene Temperaturverteilung an der Kontaktfläche zu erzielen. Das direkte Platzieren der Gefäße auf dem Boden der Kühltruhe würde aufgrund der ungleichmäßigen Verlegung der internen Kühlschläuche zu systematischen Messfehlern führen. Darüber hinaus wurde versucht, bei der beschriebenen Sensorhalterung eine einheitliche Positionierung der Messpunkte innerhalb der größeren Gefäße zu gewährleisten. Zur methodischen Fehlervermeidung trägt insbesondere bei, dass pro Versuchsreihe maximal ein Parameter variiert wurde.

Ergänzend zur Thermometrie erfolgt eine optische Analyse der Eiskörper, um den Verlauf des Gefrierens zu dokumentieren. Die Proben wurden hierbei makroskopisch hinsichtlich der Form und der Transparenz untersucht. Das anschließende Aufschneiden des Eises erlaubte zudem die Analyse der inneren Struktur.

3.3 Verworfenе Ansätze

Aufgrund technischer Beschränkungen erwiesen sich einige Ansätze als nicht realisierbar und wurden durch alternative Methoden ersetzt. Insbesondere musste die Verwendung einer Infrarotkamera und eines Ultraschallsensors zur Analyse von Temperaturverteilung und Konvektion verworfen werden, da die Gefäßwände für Infrarotstrahlung und Ultraschallwellen undurchlässig sind. Als Ersatz diente die Kombination aus der beschriebenen matrixartigen Sensoranordnung ([Abb. 1](#)) und nachfolgenden numerischen Berechnungen.

Außerdem wurde nach Versuchen auf die Verwendung einer Kamera zur Beobachtung der Gefäße innerhalb der Kühltruhe verzichtet, da die Kameras durch die Frostbildung eine stark eingeschränkte Sicht hatten. Dies wurde durch das Betrachten des Gefriervorgangs durch dem Glasdeckel der Kühltruhe sowie das beschriebene Analysieren des gefrorenen Eises kompensiert.

4. Grundlagen der Modellierung

Die theoretische Arbeit umfasst eine detaillierte numerische Modellierung des Gefrierprozesses mittels Python. Ursprünglich als eine Unterstützung des experimentellen Teils geplant, entwickelte sich diese seit 2022/23 zu einem unabhängigen Forschungsbereich, um nach theoretischen Hinweisen zum Mpemba-Effekt zu suchen.

Als physikalische Grundlage wird angenommen, dass die Wärmeleitung der dominierende Mechanismus des Wärmetransports ist, gefolgt von der Konvektion. Die Wärmestrahlung wird nicht berücksichtigt, da das Stefan-Boltzmann-Gesetz aufgrund der kleinen, gleichnamigen Konstanten und der vierten Potenz der Temperatur T^4 für den vorliegenden Temperaturbereich eine vernachlässigbare Wärmestrahlung beschreibt.

Die Berechnung basiert auf der Methode der endlichen Elemente (FEM). Hierfür wird ein zweidimensionales Gitter angelegt, welches den senkrechten Schnitt des Gefäßes darstellt. Dabei wird die vereinfachte Annahme einer rotationssymmetrischen Temperaturverteilung getroffen. Da der Mpemba-Effekt makroskopisch, d. h. über die globale Gefrierzeit definiert ist, befindet sich das System im thermodynamischen Limes. Somit werden die mikroskopischen Zustände des Wassers statistisch gemittelt, weshalb auf eine weitaus rechenintensive molekulare Modellierung für diese Arbeit verzichtet wird.

4.1 Simulation der Wärmeleitung

Zunächst wird die fundamentale Wärmeleitungsgleichung, eine partielle Differentialgleichung, betrachtet:

$$\frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial t} = \alpha \Delta T(\vec{x}, t) \quad (1)$$

wobei T die Temperatur und α die materialabhängige Temperaturleitfähigkeit ist. Durch das Ausschreiben des Laplace-Operators Δ erhalten wir für den zweidimensionalen Fall

$$\frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Unter Anwendung des zentralen Differenzenquotienten zweiter Ordnung (analog zur zweiten Ableitung)

$$\frac{(T_{i-1} - T_i) - (T_i - T_{i+1}))}{\Delta x^2} \quad (3)$$

und analog für y wird die Gleichung in eine diskrete Form umgewandelt:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \alpha \left(\frac{T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}}{\Delta y^2} \right) \quad (4)$$

Mit der Bedingung

$$|\Delta x| = |\Delta y| = 1 \text{ LE}$$

(quadratisches Gitter) gilt

$$\Delta T = \Delta t \cdot \alpha (T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1} - 4T_{i,j}). \quad (5)$$

Für die Auflösung $1 \text{ LE} = 1 \text{ cm}$ kann man als Zeitschritt 1 s verwenden. Um die Genauigkeit der FEM zu erhöhen, kann der Ortsschritt auf 1 mm verfeinert werden. Hierbei ist jedoch die Stabilitätsbedingung nach John von Neumann zu berücksichtigen, da das explizite Verfahren andernfalls zur Divergenz führt. Aus der (hier aufgrund des Umfangs nicht ausgeführten) Stabilitätsanalyse geht hervor, dass der maximale Zeitschritt für den konvergenten Fall durch folgende Bedingung begrenzt ist:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{4\alpha} \quad (6)$$

Für die maximale Temperaturleitfähigkeit von Eis, die deutlich über der von Wasser liegt [40][41], ergibt sich ein maximaler Zeitschritt von $0,208 \text{ s}$.

In die Simulation wurde zudem anfangs die experimentell beobachtete leichte Unterkühlung integriert, wobei das Leitungswasser die Temperatur von ca. -5 °C erreicht und bei der Kristallisation sprunghaft auf 0 °C ansteigt. In späteren Berechnungen wird dieser Sprung durch die physikalisch begründete Schmelzenthalpie ersetzt, die bei der Kristallisation freigesetzt wird (s. Kapitel 7.3).

4.2 Berücksichtigung der Konvektion

Im zweiten Schritt wird die Konvektion in die bisherige Simulation integriert, um deren Genauigkeit zu erhöhen. Damit eine Konvektion durch den vom Temperaturgradienten verursachten Auftrieb stattfinden kann, ist eine temperaturabhängige Funktion der Dichte erforderlich. Aus einigen Tabellen zu Wasser in der Literatur [40][41] kann man dessen Dichte bei verschiedenen Temperaturen ablesen. Durch einfaches Interpolieren der diskreten Daten in Python mithilfe von `numpy.polyfit` kann man eine Polynomfunktion der Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur erhalten. Nun wird die Konvektionsgleichung betrachtet:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{v} T) = -\left(T \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T \right) \quad (7)$$

Man kann gemäß der Boussinesq-Approximation die Annahme treffen, dass der Fluss inkompressibel ist, da der Dichteunterschied des flüssigen Wassers bei verschiedenen Temperaturen relativ klein ist. Daraus ergibt sich die Divergenzfreiheit:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (8)$$

und damit

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (9)$$

Aufgrund der bedingungslosen Instabilität bei der Methode mit Zentralfrequenzen wird hier die Upwind-Methode verwendet, bei der die Differenzenquotienten erster Ordnung je nach Vorzeichen der Gitterzelle (d. h. Strömungsrichtung) mit der vorigen oder nächsten Zelle gebildet werden.

Die Geschwindigkeit als Vektorfeld wird komponentenweise mithilfe der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen berechnet, von denen die Impulsgleichung lautet:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + g\hat{y} \quad (10)$$

wobei ρ die Dichte des Fluids, ν die Flussgeschwindigkeit, p der Druck und ν (gr. η , nicht zu verwechseln mit dem Geschwindigkeitsvektor v) die kinematische Viskosität mit $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ ist. Es wird vorausgesetzt, dass die Gewichtskraft nur in y -Richtung wirkt. Komponentenweise kann man die Gleichung notieren als

Formel (11a)

Formel (11b)

Die numerische Lösung erfolgt über ein zweistufiges Projektionsverfahren: Im ersten Schritt wird der Druckterm vernachlässigt, um ein vorläufiges Geschwindigkeitsfeld zu berechnen. Im zweiten Schritt wird der korrigierende Druck über die aus der Kontinuitätsgleichung resultierende Poisson-Gleichung separat bestimmt und in die Impulsgleichung eingesetzt.

Es gilt für die Stabilität die Courant-Friedrichs-Lewy-Bedingung

$$\left| v_x \frac{\Delta t}{\Delta x} \right| \leq 1 \quad (12)$$

(für y -Richtung analog).

Da eine dynamische Kopplung an die veränderliche Geschwindigkeit den Rechenaufwand weiter exzessiv erhöhen würde, wird pragmatisch ein fester Zeitschritt von 1 ms ausgewählt und eine Begrenzung für den Betrag der Flussgeschwindigkeit bei 1000 mm/s gesetzt. Die künstliche Begrenzung greift somit lediglich in instabilen numerischen Schwingungen als Dämpfung, ohne das Abkühlverhalten zu verfälschen.

4.3 Darstellungsmethoden

Die Berechnungen werden auf zwei Arten visualisiert. Zum einen wird der zeitliche Temperaturverlauf als T - t -Diagramm dargestellt. Dazu werden drei Punkte ausgewählt (Eckpunkt (1|1), Kernpunkt ($N/2|M/2$) sowie ein Messpunkt dazwischen ($N/4|M/4$)). Deren Temperaturverlauf wird nach der Berechnung mit Matplotlib dargestellt. Auf diese Weise lassen sich Kurvenscharen mit unterschiedlichen Temperaturen quantitativ vergleichen, bei denen man neben der Starttemperatur auch andere Parameter variieren kann (s. Kapitel 7.3).

Zum anderen wird eine Echtzeitanimation erstellt, indem die räumliche Temperaturverteilung im Gitter nach jeder Iteration abgebildet wird. Diese Methode bietet den Vorteil einer Übersicht über alle Datenpunkte, hat allerdings den Nachteil, dass diese nur den aktuellen Zeitpunkt darstellt. Ein direkter, quantitativer Vergleich verschiedener Zeitpunkte ist abseits des Speicherns einzelner Frames nur schwer realisierbar. Zudem erfordert die Animation extreme Leistung des Computers, sodass dies viel länger als die Diagrammdarstellung dauert.

$$\Delta v_{x_{ij}} = \nu (v_{x_{i+1,j}} + v_{x_{i-1,j}} + v_{x_{i,j+1}} + v_{x_{i,j-1}} - 4v_{x_{ij}}) - \frac{p_{ij} - p_{i-1,j}}{\rho_{ij}} - \frac{v_{x_{ij}}}{2} (v_{x_{i+1,j}} - v_{x_{i-1,j}} + v_{y_{i,j+1}} - v_{y_{i,j-1}})$$

Formel 11a

$$\Delta v_{y_{ij}} = \nu (v_{y_{i+1,j}} + v_{y_{i-1,j}} + v_{y_{i,j+1}} + v_{y_{i,j-1}} - 4v_{y_{ij}}) - \frac{p_{ij} - p_{i,j-1}}{\rho_{ij}} - g - \frac{v_{y_{ij}}}{2} (v_{x_{i+1,j}} - v_{x_{i-1,j}} + v_{y_{i,j+1}} - v_{y_{i,j-1}})$$

Formel 11b

Die Kombination beider Visualisierungsformen in verschiedenen Situationen ermöglicht eine sowohl zeitlich hochauflösende als auch räumlich umfassende Auswertung der Simulationsdaten.

5. Experimentelle Ergebnisse

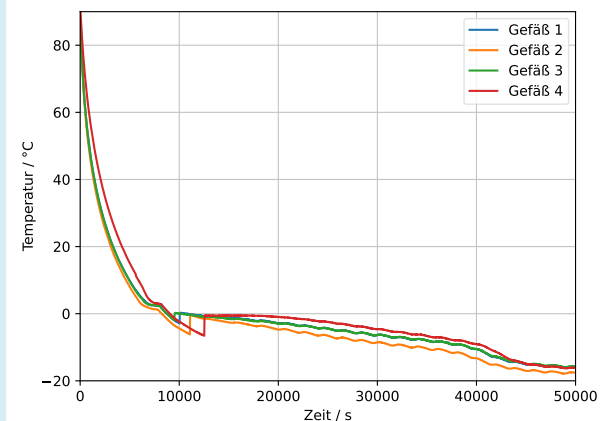
5.1 Valide thermometrische Messungen

Abb. 3 zeigt T - t -Messungen in jeweils vier Gefäßen mit einem Thermometer pro Gefäß. In Abb. 3a betrug die Starttemperatur 85 °C und in Abb. 3b 20 °C. Insgesamt weisen die Temperaturmessungen über die Zeit eine näherungsweise exponentielle Abnahme bis zur Kristallisation auf. In keiner Versuchsreihe konnte beobachtet werden, dass das ursprünglich wärmere Wasser nach kürzerer Zeit vollständig gefriert als das ursprünglich kältere Wasser.

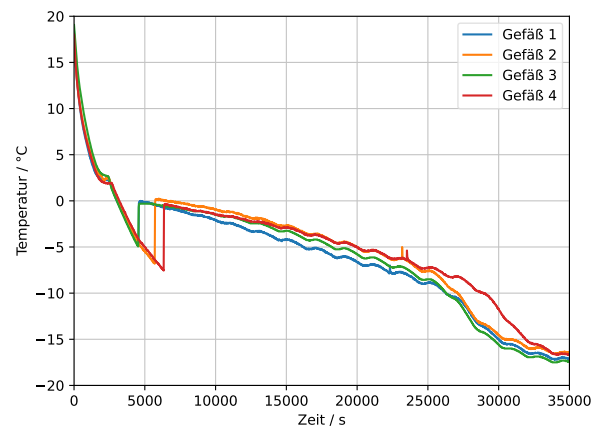
Die Geschwindigkeit der Abkühlung im gleichen Temperaturintervall ist jedoch beim ursprünglich wärmeren Wasser marginal größer, was sich in der steileren Steigung der Kurven bei entsprechender Skalierung widerspiegelt. In den Graphen gibt es außerdem markante Knicks, z. B. bei ca. 3 °C bis 4 °C. Zudem kann man einen Sprung beim Zeitpunkt der Kristallisation beobachten, bei dem die Temperatur von ca. -5 °C auf 0 °C steigt. Die Knicks und den Sprung beobachteten wir bei den früheren, manuell abgelesenen Versuchen nicht, da der Zeitabstand zwischen jedem Ablesen viel größer als die Erfassung per Mikrocontroller war. Die Temperatur nimmt anschließend langsam, näherungsweise linear ab, bis der Betrag der Steigung noch einmal zunimmt und sich die Kurve exponentiell der Umgebungstemperatur annähert. Alle Messdaten haben zudem stets eine Hintergrundoszillation, die sich – nach Messung der Lufttemperatur in der Kühltruhe – als die Auswirkung des nicht ausschaltbaren Thermostats der Kühltruhe herausstellt.

Versuche mit weiteren Starttemperaturen zeigten, dass die Zeit bis zum Gefrieren (Gefrierzeit) mit zunehmender Starttemperatur steigt. Die folgenden Ergebnisse stammen von Versuchen in Plastikbechern mit dem automatisierten Aufbau, welche in großer Menge vorliegen: Während die Wasserproben mit 90 °C Starttemperatur nach durchschnittlich ca. 11000 Sekunden an der obersten Schicht gefrieren, geschieht dies bei Proben mit 50 °C Starttemperatur bereits nach ca. 9000 Sekunden und bei denen mit 20 °C nach ca. 7000 Sekunden. Die Messunsicherheiten aufgrund der losen Platzierung (Abweichung ca. $\pm 0,5$ cm) der Thermometer betragen bis zu 1500 Sekunden (im Folgenden als Streuung gesetzt), wie auch in Abb. 3 sichtbar ist.

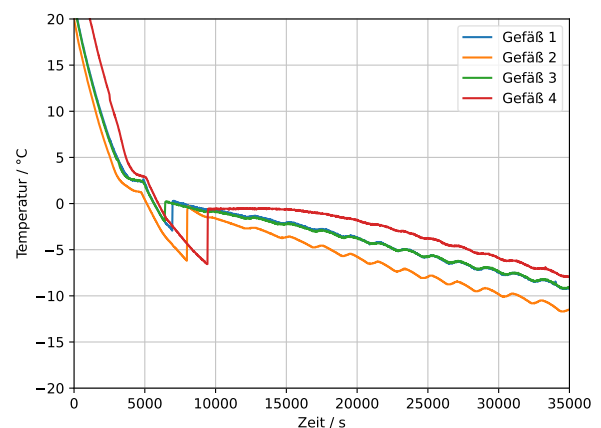
Die im Kapitel 3.1 erläuterten Volumenvariationen (± 10 ml) zeigen hingegen kaum Auswirkungen. Die Differenzen beim Gefrierzeitpunkt betragen maximal etwa 1000 s bis 1500 s,



a)



b)



c)

Abb. 3: Vier gleichzeitige Temperaturmessungen mit jeweils a) 85 °C Starttemperatur und b) 20 °C Starttemperatur. In c) wird dieselbe Messung von a) mit der gleichen Skalierung von b) dargestellt. Es lässt sich auch nach Abzug der Messunsicherheiten kein Mpemba-Effekt beobachten.



Mess. links	Mess. Mitte	symmtr.	symmetr.
1.5	1.2333	1.2333	1.5
1.1	0.8	0.8	1.1
0.7	0.3666	0.3666	0.7
0.3	-0.0666	-0.0666	0.3
-0.1	-0.5	-0.5	-0.1
-0.5	-0.9333	-0.9333	-0.5

Mess. links	Mess. Mitte	symmtr.	symmetr.
1.2666	1.1666	1.1666	1.2666
0.9	0.9	0.9	0.9
0.5333	0.6333	0.6333	0.5333
0.1666	0.3666	0.3666	0.1666
-0.2	0.1	0.1	-0.2
-0.5666	-0.1666	-0.1666	-0.5666

Abb. 4: Interpolation der Array-Messung (die Zeilen 2 und 5 wurden jeweils mit dem Aufbau in Abb. 1 gemessen). Die Zellen entsprechen im Gefäß einem Querschnitt von $1 \times 1 \text{ cm}^2$.

was den obigen Messunsicherheiten sehr nahekommt und deswegen zu vernachlässigen ist. Auch Versuche mit der Folienversiegelung zeigen im Rahmen der Streuung keinen Unterschied. Dabei ist lediglich die gesamte Gefrier- und Abkühlgeschwindigkeit bei allen Proben global langsamer aufgrund des minimalen Druckunterschieds zum unversiegelten Wasser.

Auch die Versuche zu gelösten Gasen weisen keine Unterschiede auf. Das abgekühlte abgekochte Wasser gefriert im Rahmen der Messunsicherheiten gleich schnell wie unbehandeltes Leitungswasser; auch das mit Magnetrührer erhitzte Wasser gefriert nach ähnlich viel Zeit wie das mit Wasserkocher erhitzte Wasser. Die Abweichungen liegen alle innerhalb des oben genannten $1\text{-}\sigma$ -Intervalls.

Die Versuche mit Bechergläsern benötigten beim gleichen Füllstand von 200 ml mehr Zeit bis zum Gefrierpunkt als diejenigen mit den Plastikbechern. Bei sehr niedrigen Füllständen (z. B. 50 ml) verläuft das Gefrieren im Becherglas schneller.

Des Weiteren konnte durch die Versuche mit dem Array aus vier Thermometern im großen Becherglas eine qualitativ unterschiedliche Temperaturverteilung im ursprünglich kälteren und wärmeren Wasser beobachtet werden. Während bei beiden Proben insgesamt der bodennahe Bereich zuerst gefriert, gefriert beim kälteren Wasser zuerst der Rand und beim wärmeren Wasser zuerst die Mitte. Diese Daten wurden zur Visualisierung in einer Excel-Tabelle interpoliert (s. [Abb. 4](#)).

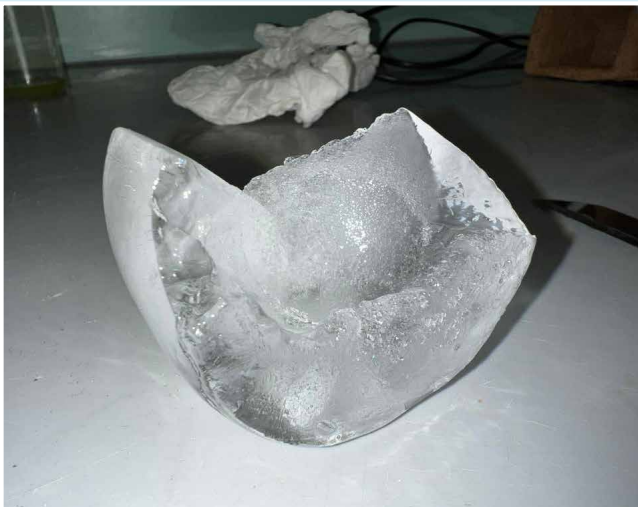
5.2 Invalide Versuche

Der Versuch mit dem großen Einmachglas (2022) brachte aufgrund des damals noch nicht vorhandenen vollautomatischen Aufbaus kein valides Ergebnis, da das vollständige Gefrieren aufgrund des isolierenden Eises und des Thermostats der Kühltruhe mehr als eine Woche dauerte. Der Versuch wurde aus Sicherheits- und Kostengründen nicht wiederholt, da die Volumenzunahme der großen Menge gefrierenden Wassers den Bruch der Glaswände verursachte.

Darüber hinaus war der Versuch mit destilliertem Wasser ebenfalls nicht zielführend, da trotz der Vibrationen durch den Kompressor der Kühltruhe und der Kühltemperatur von ca. $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ keine Kristallisation stattfand und das Wasser stark unterkühlt wurde. Bidestilliertes oder weiter deionisiertes Wasser sind daher makroskopisch ungeeignet, um bei üblichen Gefrierbedingungen einer Tiefkühltruhe die Kristallisation einzuleiten, da solches Wasser oft bis unter $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ flüssig bleibt. Auf das Einbringen von Temperatursensoren wurde bewusst verzichtet, da die Sondenoberfläche als künstlicher Kristallisationskeim gewirkt und das Phänomen verfälschen würde. Da destilliertes Wasser bei der Untersuchung des Mpemba-Effekts jedoch nicht entscheidend ist [\[1\]](#), wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

5.3 Optische Beobachtungen

Die Struktur des Eises liefert ebenfalls Hinweise zum Gefrierprozess. Zum einen kann ein kegelstumpfförmiger Hohlraum (gemeint ist ein mit nicht gefrorenem Wasser gefüllter Raum,



a)



b)

Abb. 5: a) Bilder des Eises nach Aufschnitt und Entfernung des inneren Wassers zur optischen Untersuchung. b) Bilder des Eises im Polystyrol-Becher. Sichtbar ist die spitzenförmige Struktur an der Oberfläche.



s. Abb. 5) im Inneren des Eises beobachtet werden. Im Gefäß ist dieser als milchig-trüb zu erkennen; nach dem Aufschneiden des Eises und der Entfernung des dortigen Wassers ist der beschriebene Hohlraum zu sehen. Zum anderen beobachtet man an der Oberfläche des Eises eine ausgeprägte bergförmige Spitze, die im Inneren ebenfalls trüb ist.

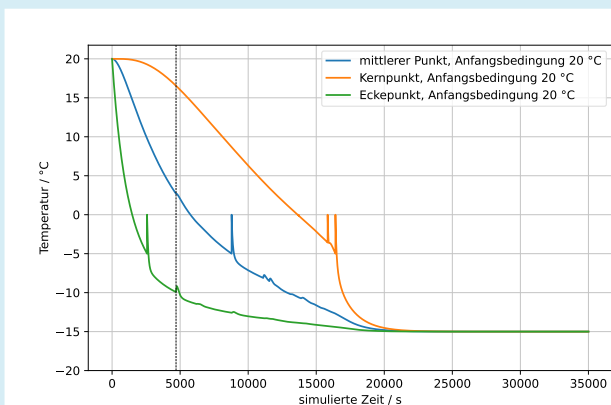
Bei den Versuchen mit Magneten lassen sich ausschließlich optische Aussagen zum Eis treffen, da die Kabelthermometer durch die metallischen Bauteile im starken Magnetfeld nicht funktionierten. Die Versuche mit Elektromagneten erwiesen sich als unbrauchbar, da diese eine durch den Innenwiderstand heizende Wirkung haben. Mit Permanentmagneten wurde beobachtet, dass das Eis strukturell zwar an der Oberfläche weniger spitz ist als jenes ohne den magnetischen

Einfluss, jedoch im Inneren sich kaum von Letzterem unterscheidet.

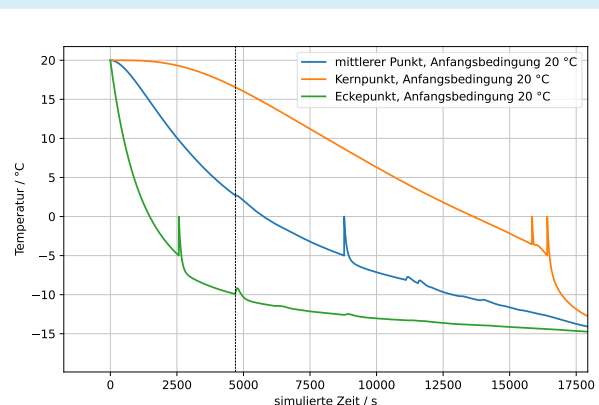
6. Ergebnisse der Modellierung

6.1 Temperaturverlauf als Graph

Die Darstellung als T - t -Diagramm ist nur bei der Simulation der Wärmeleitung möglich, da die Berechnung der Konvektion sehr hohe Rechenleistung erfordert und nur als Animationen mit wenigen zwischengespeicherten Frames gezeigt werden kann. Für 1 ms simulierte Zeit benötigt die Berechnung mit Konvektion ca. 4 s. Die benötigte Zeit nimmt aufgrund des Speichers und der komplizierter werdenden Berechnungen zu. Im Folgenden wird zur qualitativen Analyse exempla-



a)



b)

Abb. 6: Simulation mit 20 °C Starttemperatur ohne Konvektion. Die drei Kurven zeigen die Temperatur am Kern, am mittleren Gitterpunkt und an einer Ecke. In a) wird die komplette Simulation dargestellt, in b) ein Ausschnitt zur Visualisierung des Knicks bei der Markierung.



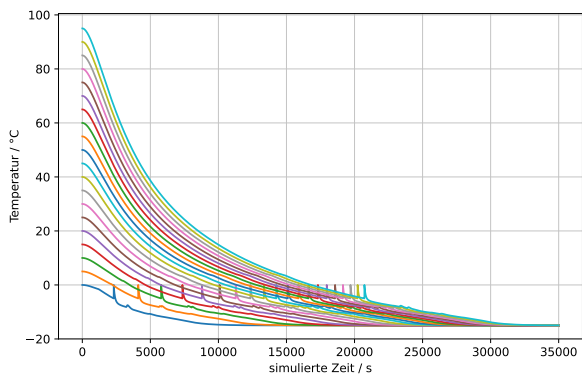


Abb. 7: Schar der Simulationen ohne Konvektion, mit Starttemperaturen von 0 °C bis 95 °C. Die Legende wird zur Übersicht entfernt.

risch die Simulation ohne Konvektion bei 20 °C Starttemperatur erläutert (s. Abb. 6); die Auffälligkeiten sind übertragbar auf andere Anfangswerte (s. Abb. 7 und 8).

In Abb. 6 sind mehrere Knicks in den näherungsweise exponentiell fallenden Graphen sichtbar, die beim gemeinsamen Betrachten der drei Graphen auffallen. Diese Knicks treten unterschiedlich stark, jedoch zeitgleich bei allen drei Graphen auf. Andererseits lässt sich nach der Kristallisation des betrachteten Gitterpunktes sofort eine wesentlich größere Abnahmerate beobachten. Dies geschieht am Kernpunkt besonders stark, sodass dort ca. 5000 s nach der Kristallisation bereits die Umgebungstemperatur in der simulierten Kühltruhe näherungsweise erreicht wird.

Im Bezug auf den Gefrierzeitpunkt lässt sich sagen, dass das erste Gefrieren an den Eckpunkten bereits nach ca. 2500 s

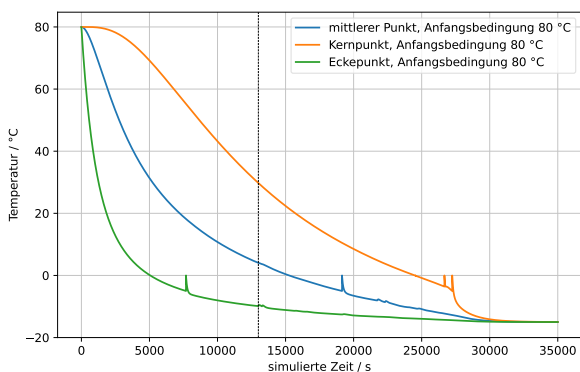
stattfindet. Der mittlere Gitterpunkt, der die Position des tatsächlichen Thermometers aus dem experimentellen Teil simulieren soll, gefriert nach ca. 9000 s. Das vollständige Gefrieren findet bei ca. 20000 s statt, d. h. wenn der Kernpunkt gefriert. In Abb. 6 wird ebenfalls sichtbar, dass beim ersten Gefrieren der Eckpunkte sich der Kernpunkt noch nahezu unverändert auf dem anfänglichen Temperaturniveau befindet.

Abb. 7 zeigt die Simulation ohne Konvektion als Schar mit Starttemperaturen von 0 °C bis 95 °C. Die Graphen schneiden sich – außer bei dem jeweiligen Sprung auf 0 °C – nicht. Wie bei den praktischen Versuchen ist im gleichen Temperaturintervall die Abkühlrate von Graphen mit höheren Starttemperaturen größer als von jenen mit niedrigeren Starttemperaturen. Trotz dieser schnelleren Abkühlrate reicht es jedoch auch hier nie aus, Wasser mit beliebig niedrigerer Starttemperatur beim Gefrieren zu überholen.

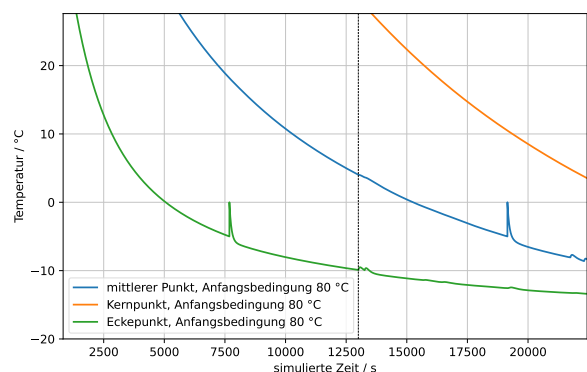
6.2 Temperaturverlauf als Animation

Bei den Animationen ohne Berücksichtigung der Konvektion kann man Achsensymmetrien entlang der horizontalen und vertikalen Mittellinien erkennen. Das Wasser kühlt sich dabei stets zunächst von den Rändern ab, wobei die Abkühlung an den Ecken am schnellsten verläuft. Die verbleibende, noch nicht gefrorene Fläche wird mit dem Fortschreiten der Zeit immer kleiner und tendiert dazu, trotz der rechteckigen Form der Domäne elliptisch zu werden.

Auch hier lassen sich die oben beschriebenen Ergebnisse für alle Punkte im Gitter beobachten: Nach der Kristallisation an einem Punkt bei 0 °C nimmt die Temperatur sehr schnell ab. Die Auswirkungen des Temperatursprungs beim Kristallisieren auf andere Punkte ist ebenfalls bemerkbar. Es ist festzu-



a)



b)

Abb. 8: Simulation mit 80 °C Starttemperatur ohne Konvektion. Die drei Kurven zeigen die Temperatur am Kern, am mittleren Gitterpunkt und an einer Ecke. In a) wird die komplette Simulation dargestellt, in b) ein Ausschnitt zur Visualisierung des Knicks bei der Markierung.

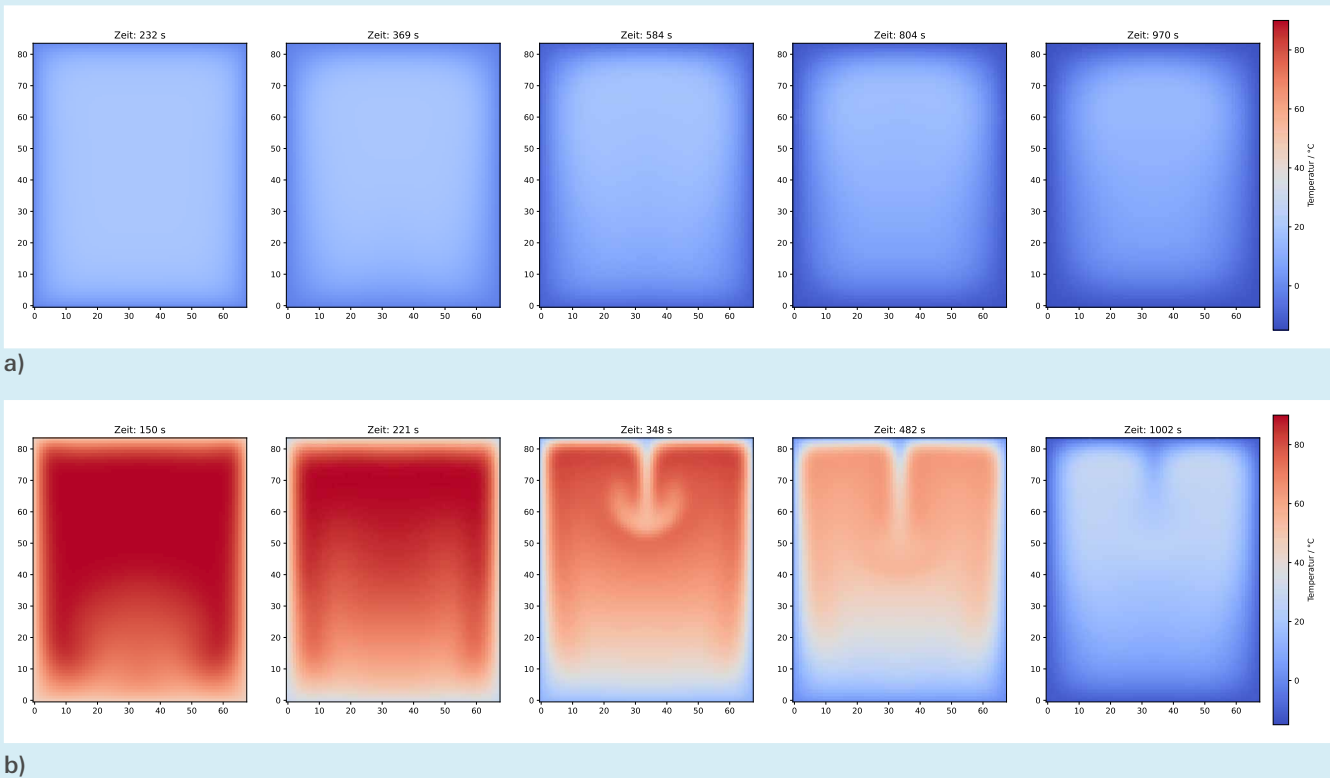


Abb. 9: Simulation mit Konvektion bei a) 20 °C Starttemperatur und b) 80 °C Starttemperatur. Hierbei wurden innerhalb des technischen Rahmens repräsentative Bilder aus den langen Animationen extrahiert. Es ist der beschriebene qualitative Unterschied des Abkühl- und Gefrierhaltens zwischen kaltem und warmem Wasser zu erkennen.



stellen, dass entferntere Punkte trotz der numerischen Verzögerung auch auf den Temperatursprung reagieren.

Bei den Animationen mit Berücksichtigung der Konvektion (siehe [Abb. 9](#)) sind trotz der technisch bedingt kurzen simulierten Zeit einige Auffälligkeiten erkennbar. Zunächst ist festzustellen, dass die Temperaturverteilung nicht mehr entlang der horizontalen Mittellinie symmetrisch ist. Es lässt sich lediglich eine Spiegelung an der vertikalen Mittelachse durch die Symmetrie der diskreten Konvektionsgleichung (s. Kapitel 4.2) erkennen. Anders als bei der reinen Betrachtung der Wärmeleitung wird hier der untere Rand mehr abgekühlt. Anschließend folgen die Randbereiche oben links und oben rechts, die danach bei der simulierten „Oberfläche“ eine Eisschicht bilden. Insgesamt lässt sich ein leicht schnelleres Gefrieren bei allen solchen Simulationen im Vergleich zu denen mit ausschließlicher Betrachtung der Wärmeleitung feststellen.

Der Anteil, wie stark das Gefrieren von der unteren Seite geschieht, hängt von der Starttemperatur ab. Je höher diese ist, desto gleichmäßiger ist der Abkühl- und Gefrierprozess und der im experimentellen Teil beschriebene flüssige „Hohlraum“ im Kern des Eises verschiebt sich mehr nach oben. Zu-

dem ist die gesamte Abkühlrate im Vergleich zur reinen Berechnung der Wärmeleitung etwas schneller.

Zu beobachten ist auch, dass beim ursprünglich wärmeren Wasser die Eisbildung auf der Unterseite in der Mitte mehr ausgeprägt ist ([Abb. 8b](#)), während beim ursprünglich kälteren Wasser die Eisbildung an den Wänden stärker ist ([Abb. 8a](#)). Dennoch ist die Eisbildung in der gesamten Domäne zum gleichen Zeitpunkt beim kälteren Wasser stets mehr ausgeprägt als beim wärmeren Wasser.

7. Diskussion

7.1 Interpretation der theoretischen Ergebnisse

Der näherungsweise exponentielle Abfall der Kurven im T - t -Diagramm ist mathematisch durch den diffusiven Charakter der Wärmeleitungsgleichung begründet. Die darin vorhandenen Knicks und Sprünge lassen sich durch die Kristallisation erklären: Das sprunghafte Anheben der Temperatur einer Zelle auf den Schmelzpunkt beeinflusst über den diskreten Differenzenquotienten unmittelbar das thermodynamische Verhalten der benachbarten Gitterzellen (vgl. [Abb. 6](#) und [8](#)). Das Ausbreitungsverhalten dieses thermischen Im-

pulses folgt der klassischen Wellendämpfung: Mit zunehmender räumlicher Distanz zur Quelle nimmt die Amplitude des Temperatursprungs exponentiell ab, während die Verzögerung zunimmt.

Die horizontale und vertikale Achsensymmetrie bei der reinen Wärmeleitung ist eine direkte Folge der homogen gewählten Dirichlet-Randbedingungen (Umgebungstemperatur). Da das rein diffusive Modell keinerlei Advektion enthält, erfolgt der Wärmetransport isotrop von den Rändern nach innen. Daraus resultiert auch die Transformation des flüssigen Kerns in eine elliptische Form: An den Ecken der Simulationsdomäne addieren sich die orthogonalen Ströme aus zwei Richtungen, was mathematisch zu einem lokal stark erhöhten Gradienten im Laplace-Operator führt. Die Ränder hingegen unterliegen lediglich einem eindimensionalen Wärmestrom von innen, weshalb die Temperaturabnahme in den Eckbereichen am schnellsten fortschreitet.

Dies ändert sich nach der Berücksichtigung der Konvektion. Aufgrund des Auftriebs durch den vertikalen Dichtegradienten (zumindest oberhalb der Dichteanomalie von 4 °C) formt sich eine thermische Schichtung, bei der sich wärmeres Wasser im oberen Bereich der Domäne akkumuliert. Dies beschleunigt den Wärmeaustausch an der Unterseite, während die Abkühlrate an der Oberseite verzögert wird. Die oberen Ecken gefrieren dennoch zügig, da diese geometrisch bedingt außerhalb der starken Konvektionsströme liegen und somit primär diffusiv (über Wärmeleitung) abkühlen.

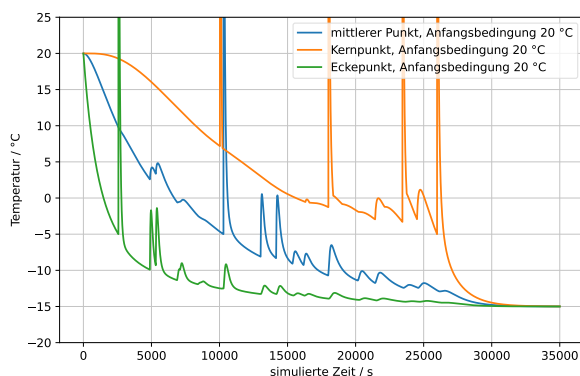
Daraus folgt, dass die qualitative Temperaturverteilung von der Stärke der Konvektion abhängig ist. Aufgrund des großen Temperaturgradienten zur Umgebung entsteht im warmen

Wasser (z. B. 90 °C) ein ebenfalls großer Dichtegradient. Die Konvektion ist daher sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung stark ausgeprägt, was zu einer Homogenisierung des Temperaturfeldes im flüssigen Bereich führt. Beim kalten Wasser (z. B. 20 °C) ist durch den geringeren Temperaturunterschied zur Umgebung die Konvektion und somit der Impuls der Strömung signifikant geringer. Das System neigt daher zu einer raschen Schichtung nach der Dichte. Dies erklärt, warum der Gefäßboden beim kälteren Wasser deutlich früher gefriert als die Oberfläche.

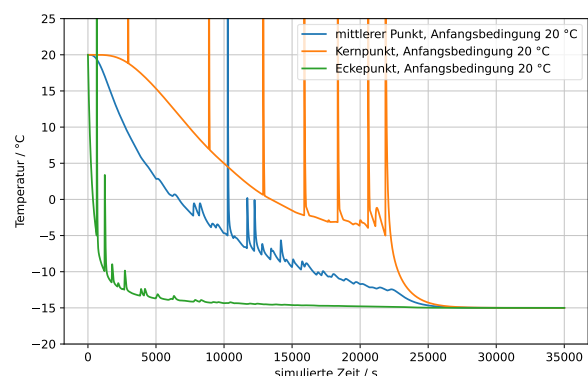
Die Konvektion ist qualitativ daher eher hintergründig im Vergleich zur dominierenden Wärmeleitung: Erstere verändert insgesamt zwar die lokale Verteilung der thermischen Energie bei Wasser mit verschiedenen Temperaturen, kann beim warmen Wasser jedoch den globalen Wärmetransport an den Rändern nicht im Sinne des Mpemba-Effekts beschleunigen. Ein schnelleres Abkühlen bzw. Gefrieren des ursprünglich wärmeren Wassers ist somit auch im theoretischen Modell unter den definitionsgemäßen identischen Bedingungen bei allen Starttemperaturen nicht zu beobachten.

7.2 Interpretation der validen experimentellen Ergebnisse

Die in Kap. 5.1 genannte Streuung des Kristallisationszeitpunktes von 1500 s aus dem Vergleich innerhalb jeder Versuchsreihe entspricht einer durch viele Faktoren wie Messfehler der Thermometer, deren Platzierung und Umgebungsbedingungen entstandenen statistischen Unsicherheit von ± 750 s. Ein allgemeiner systematischer Fehler taucht in den Messwerten nicht auf. Durch das Gesetz der großen Zahlen wurde bei der Vielzahl der Messungen die Auswirkung



a)



b)

Abb. 10: Simulation ohne Konvektion bei Starttemperatur 20 °C, mit Gittergröße a) 1 cm und b) bei 0,5 cm (der Zeitschritt wurde jeweils zur Stabilität angepasst). Berücksichtigung der Schmelzenthalpie führt zu numerischen Delta-Peaks wie dargestellt. Nach Mittelwertbildung für die Peaks (hier aus Platzgründen nicht ausgeführt, jedoch optisch vorstellbar) ist ein ähnlicher Verlauf wie bei den Messungen zu erkennen. Zur besseren Darstellung der Kurve wird die Spitze des Peaks abgeschnitten.

durch Ausreißer vernachlässigbar. Da alle gemessenen Differenzen unter Variation der Parameter hinsichtlich der Verdunstung und gelöster Gasen innerhalb dieses statistischen Fehlerbereichs liegen, kann kein realer physikalischer Einfluss dieser Aspekte auf den Gefrierprozess gefunden werden.

In den Versuchen mit unterschiedlichen Gefäßen beim gleichen Füllstand kommt das schnellere Gefrieren beim Plastikbecher zustande, dass einerseits dieser eine viel geringere Wanddicke als ein Becherglas hat und damit die bessere Wärmeleitfähigkeit des DURAN-Glases kompensiert. Andererseits ist dies auch auf die geometrische Natur zurückzuführen, dass das Becherglas entlang der Radialachse gestauchter ist und das Wasser darin beim gleichen Volumen von 200 ml weniger Oberfläche als im Plastikbecher besitzt. Bei sehr niedrigen Füllständen dominieren die größeren Kreisflächen beim Becherglas, und das Wasser im Plastikbecher hat in dem Fall mehr Oberfläche, was beim gleichen Volumen zum langsameren Gefrieren beiträgt. Da die Definition des Mpemba-Effekts die gleichen Rahmenbedingungen für Vergleichsproben vorschreibt, sind das Material und die Form der Gefäße lediglich Faktoren, die zum schnellen Gefrieren, jedoch nicht zum Mpemba-Effekt beitragen.

Der Mpemba-Effekt kann also auch im experimentellen Bereich nicht beobachtet werden. Das ursprünglich wärmere Wasser gefriert bei den durchgeführten Variationen der Parameter nicht schneller als das kältere Wasser. Wir stellen dafür die Hypothese auf, dass dieser ein durch systematische und statistische Messfehler sowie Störungen in der Umgebung bedingter Scheineffekt ist. Diese Hypothese wird mithilfe der Simulation überprüft und im Abschnitt 7.4 näher erläutert.

7.3 Vergleich experimenteller und theoretischer Ergebnisse

Die Simulationen ohne Konvektion liefern Resultate, die über den ursprünglichen Erwartungen liegen. So ist z. B. der Verlauf der Temperatur beim mittleren Simulationspunkt ($N/4|M/4$) bis zur Kristallisation weitestgehend deckungsgleich mit den Messdaten. Die Kristallisation dieses Punkts geschieht bei 20 °C Starttemperatur nach ca. 9000 s, was etwas später als bei den Messungen ist. Bei wärmerem Wasser ist das spätere Eintreten der Kristallisation noch deutlicher zu sehen, die Verzögerung liegt jedoch am Fehlen der Konvektion, mit welcher der simulierte Gefrierprozess schneller verlaufen würde (s. Kapitel 6.2).

Die Knicks bei den Messgraphen befinden sich etwa an denselben Stellen wie bei der Simulation und lassen sich dementsprechend auch mit der Erklärung aus dem Kapitel 7.1 für die Knicks bei der Simulation erklären.

Die Abnahmerate des simulierten Graphen wird nach der

Kristallisation der betrachteten Zellen durch die höhere Temperaturleitzahl von Eis im Vergleich mit Wasser schlagartig sehr groß – was nicht realistisch ist (vgl. [Abb. 6](#) und [8](#)). Dies lässt sich beheben, indem der künstlich implementierte Temperatursprung durch die Berechnung der Schmelzenthalpie ersetzt wird. Diese Energie ist erforderlich, um beim Übergang von der festen in die flüssige Phase intermolekulare Kräfte, insbesondere Wasserstoffbrücken, zu überwinden, und beträgt im Fall von Wasser 334 J/g [\[40\]](#). Es ist hierbei anzumerken, dass beim Schmelzübergang lediglich ein kleiner Teil der Wasserstoffbrücken aufgebrochen wird, während der überwiegende Anteil (> 80 %) in der flüssigen Phase erhalten bleibt. Dennoch ist die resultierende latente Wärme im Vergleich zu anderen Stoffen deutlich höher.

Bei der Kristallisation wird gemäß der Energieerhaltung genau diese Energie frei, was als Quellterm zu der Wärmeleitungsgleichung addiert werden kann. Die Äquivalenz von Energie und Temperatur ist

$$\Delta E = cm\Delta T \quad (13a)$$

bzw. auf Teilchenebene

$$\Delta E = c\rho\Delta T \quad (13b)$$

Somit lautet die modifizierte Wärmeleitungsgleichung für den Zeitpunkt der Kristallisation:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\Delta T + \frac{1}{c\rho} E_{fus} \quad (14)$$

mit der spezifischen Schmelzenthalpie $E_{fus} = 334 \text{ J/g}$.

Dadurch erhöht sich die Temperatur zwar für den Moment der Kristallisation schlagartig auf ca. 80 °C (s. [Abb. 10](#)), was nicht der physikalischen Realität entspricht, sich jedoch auf die numerische Diskretisierung eines in der Realität unendlich schmalen Dirac-Delta-Peaks zurückführen lässt. Durch das Fortschreiten der Kristallisation entstehen numerisch viele weitere Peaks, die in der Realität unendlich dicht aufeinanderfolgen und somit eine glatte Kurve ergeben. Durch eine dynamische Mittelwertbildung bei jedem Peak (wie dies durch den Leser in [Abb. 10](#) direkt optisch vollzogen werden kann) entsteht also eine Kurve, die den Messungen sehr nahekommt.

Mit dieser zusätzlichen Berücksichtigung der Schmelzenthalpie verzögert sich jedoch auch der Zeitpunkt des vollständigen Gefrierens über die gesamte Domäne leicht. Man könnte dies mit dem Einbau der Konvektion beschleunigen, was durch die genannten technischen Hürden jedoch zurzeit nicht umgesetzt ist.

Es lässt sich ferner ebenfalls erklären, weshalb die Unterküh-

lung kein kausaler Faktor des Mpemba-Effekts ist. Einerseits ist experimentell keine Evidenz einer stärkeren Unterkühlung des kalten oder warmen Wassers gegeben. Die Unterkühlung des Leitungswassers ist zudem gefäßunabhängig stets bis ca. -5 °C gemessen worden. Andererseits erstarrt ohnehin die kalte Wasserprobe nachweislich (s.o.) früher an den Rändern des Gefäßes und profitiert unmittelbar von der deutlich höheren Temperaturleitzahl des gebildeten Eises. Das ursprünglich wärmere Wasser verbleibt also im Kern länger in der flüssigen Phase – unabhängig davon, ob das kalte oder warme Wasser mehr unterkühlen würde. Da das vollständige Gefrieren allein das notwendige Kriterium beim Mpemba-Effekt ist, könnte die Unterkühlung außerdem nur die verzögerte Kristallisation eines Messpunktes oder eines sehr kleinen, homogenen Bereichs erklären (s. Kapitel 7.4), nicht jedoch das langsamere globale Gefrieren einer gesamten Wasserprobe.

Die Simulationen zeigen außerdem, dass insbesondere beim ursprünglich kälteren Wasser der Bereich am Boden und an der oberen Seitenwand zuerst gefriert, gefolgt von der Oberfläche. Durch den Überdruck im Inneren kann daher ein Teil des Wassers für eine sehr lange Zeit nicht gefrieren, was zu dem experimentell beobachteten Hohlraum im Inneren des Eises führt. Daraus kann man auch Schlüsse über die experimentelle Eisbergstruktur an der Oberfläche ziehen. Das Wasser im Inneren des Kegelstumpfs dehnt sich durch die Dichteanomalie des Wassers nach oben aus, wo die einzige verbleibende Öffnung aufgrund der noch nicht komplett gefrorenen Oberfläche ist. Diese Öffnung wird beim Gefrieren immer kleiner, weshalb nach dem vollständigen Gefrieren eine Spitze in der Mitte der Oberfläche entsteht.

Durch thermometrische Messungen wurde zudem festgestellt, dass kleine Abweichungen der Volumina durch mehr Verdunstung des wärmeren Wassers nicht zum schnelleren Gefrieren führen. Dies lässt sich ebenfalls mittels der Simulation bestätigen (s. Abb. 11). In der Schar der Graphen mit verschiedenen Starttemperaturen wird das Gitter in y -Richtung beim Wasser mit mehr als 80 °C Starttemperatur um 1 cm verkleinert, was eine sehr radikale Volumenänderung ist. Es muss hierbei durchaus angemerkt werden, dass diese rein geometrische Anpassung primär den Volumenverlust der Verdunstung abbildet. Der kühlende Effekt der Verdunstungswärme wird aufgrund der numerischen Komplexität hierbei nicht explizit als veränderliche Randbedingung simu-

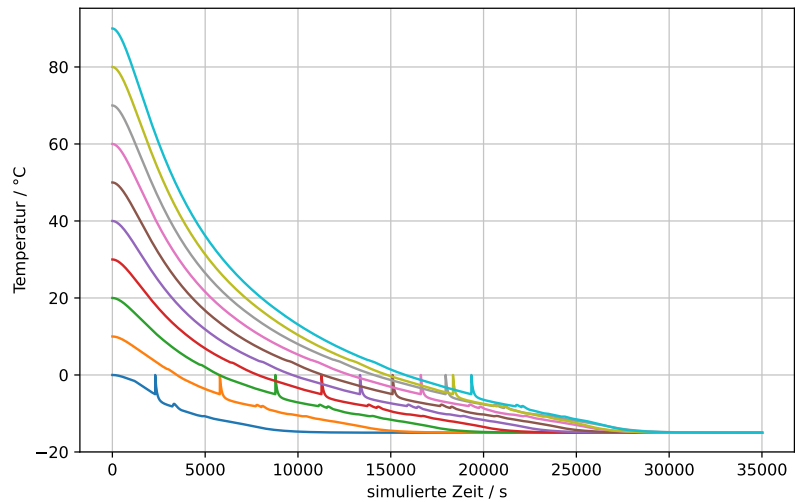


Abb. 11: Schar aus Simulationen ohne Konvektion. Ab 80 °C Starttemperatur wurde der Wasserstand um 1 cm niedriger gesetzt, um einen (sehr übertriebenen) Volumenverlust durch Verdunstung zu simulieren. Hierbei lässt sich der Mpemba-Effekt nicht beobachten. Die dargestellten Temperaturen sind dem mittleren Simulationspunkt ($N/4|M/4$) entnommen.

liert. Jedoch lässt sich selbst bei dieser massiven Reduktion des Volumens kein schnelleres Gefrieren des wärmeren Wassers feststellen. Außerdem kann der dabei entstehende warme Wasserdampf die Umgebungstemperatur erhöhen, sodass die Kühlung effektiv wieder stark gehemmt wird (s. Kapitel 7.4).

Eine Simulation der Konvektion bis zum Zeitpunkt der Kristallisation ist technisch aufgrund der langen Laufzeit nicht möglich (s. Kapitel 6.1). Dennoch ist die vorhandene Simulation mit Messungen qualitativ vergleichbar. Insbesondere bei der Messung mit dem Array aus vier Thermometern erkennt man eine ähnliche Temperaturverteilung im unteren Bereich der Gefäße (vgl. Abb. 4 und 9). Das Gefrieren von der Mitte bzw. vom Rand aus ist dementsprechend durch die konvektiven Ströme zu erklären.

7.4 Ursachen für mögliches Beobachten des Mpemba-Effekts

Da der Mpemba-Effekt in mehreren Publikationen als beobachtet beschrieben wird [1][3][4][6][8][11][15][18], ist die Frage zu klären, wie die Diskrepanz zu den experimentellen und theoretischen Ergebnissen dieser Arbeit entsteht. Die im experimentellen Teil aufgestellte Hypothese, dass der Mpemba-Effekt ein messtechnischer Scheineffekt ist, der durch Unsicherheiten der Messung und Störungen im Wasser oder in der Umgebung induziert wird, wird im Folgenden mittels der Simulationen untersucht. Dabei wird jeweils ein Parameter derart modifiziert, dass dessen Wert ab einer vordefinierten Temperatur geringfügig variiert wird (vgl. Abb. 12).

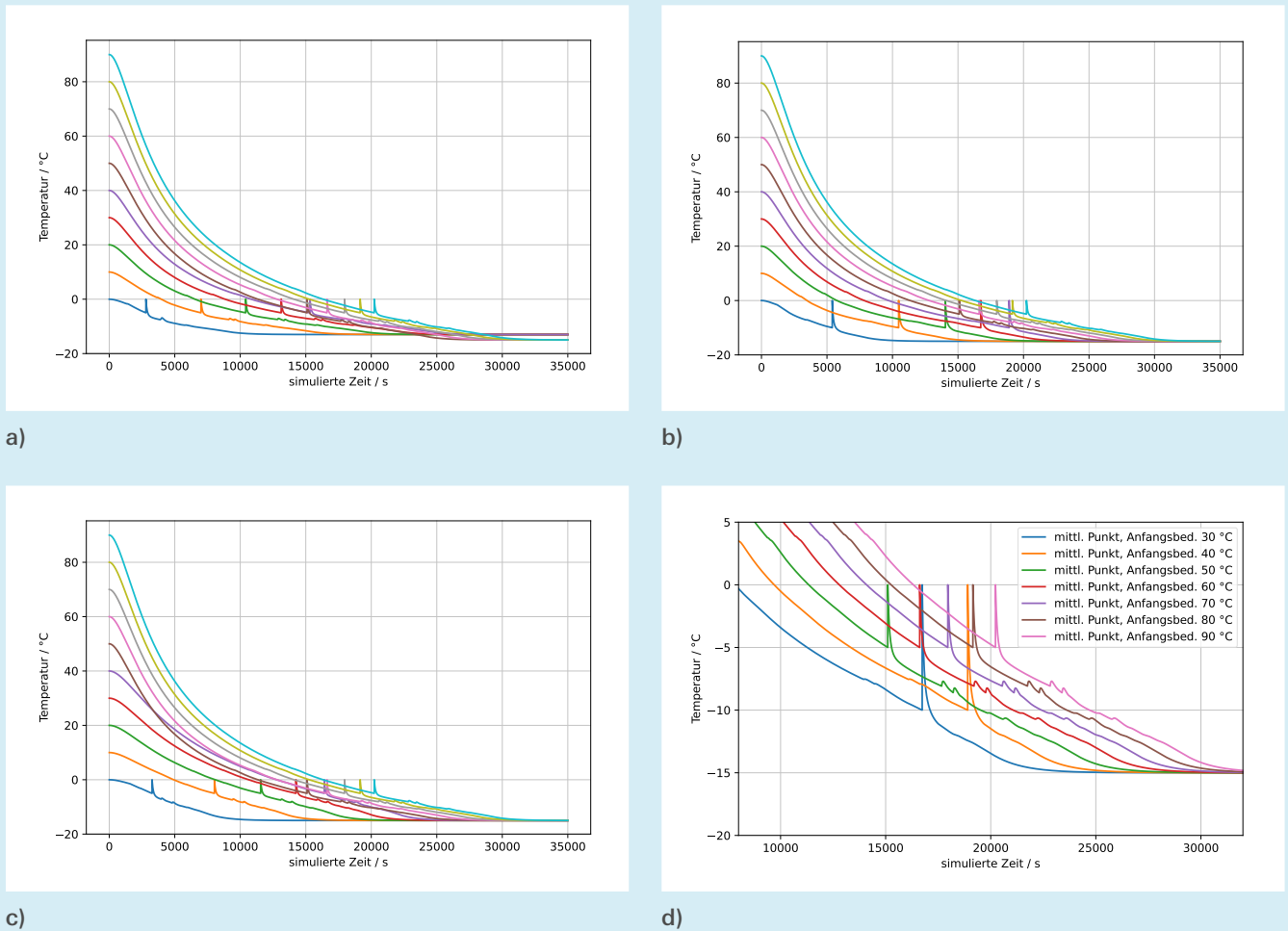


Abb.12: Schar aus Simulationen ohne Konvektion, mit jeweils ab 45 °C

a) 5 °C niedrigerer Umgebungstemperatur, b) 5 °C schwächerer Unterkühlung am Messpunkt, c) 1 cm Verschiebung der Messposition.

Die gezeigten Temperaturen sind dem mittleren Simulationspunkt ($N/4|M/4$) entnommen. Man erkennt, dass darin das Auftreten des Mpemba-Effekts dargestellt wird.

Bei der Unterkühlung ist jedoch der Mpemba-Effekt nur eine lokale Täuschung: Es ist in der Vergrößerung d) zu sehen, dass das globale vollständige Gefrieren des ursprünglich kälteren und stärker unterkühlten Wassers dennoch schneller ist.



Messfehler können z.B. durch eine ungenaue Positionierung der Thermometer verursacht werden. Mit der Graphenschar der Simulation lässt sich bestätigen, dass bereits eine horizontale Verschiebung des Messpunkts um 1 cm (bei 7 cm Durchmesser) die fälschliche Beobachtung des Mpemba-Effekts hervorrufen kann.

Neben den Messfehlern können auch Störungen im Wasser, beispielsweise die zuvor erwähnte Unterkühlung, in Kombination mit einer punktförmigen Messung zu Fehlinterpretationen führen. Eine schwächere Unterkühlung des kälteren Wassers ist bereits bei 2 °C Unterschied entscheidend für das Überholen des warmen Wassers bei der punktwisen Kristallisation, wie die Simulation zeigt. Wie in Kapitel 7.3 dargestellt, betrifft diese Verzögerung jedoch immer nur einen klei-

nen Bereich um den Messpunkt und ist global unabhängig von der Starttemperatur und der Beschaffenheit der (in dieser Arbeit verwendeten) Gefäße (s. Abb. 12d)). Sie wäre abhängig von der verwendeten Flüssigkeit und von Gefäßen anderer Arten, was jedoch mit identischen Bedingungen in Widerspruch steht.

Andere Störungen kann z.B. Inhomogenität der Temperatur am Kühlort sein. Durch die erwähnte Belegung der Kühlschläuche einer Kühltruhe kommt es zu Unterschieden bei der Temperatur an verschiedenen Stellen, was die Simulation zeigt: Die Erhöhung der Umgebungstemperatur von -15 °C auf -10 °C löst bereits deutlich den scheinbaren Mpemba-Effekt aus.

Der Mpemba-Effekt, definiert durch das makroskopische schnellere Gefrieren von warmem Wasser gegenüber kaltem unter identischen Bedingungen, konnte nach dieser Arbeit also nicht nachgewiesen werden. Dies entspricht auch den Hauptsätzen der Thermodynamik. Stattdessen kann es im Alltag durchaus vorkommen, dass warmes Wasser schneller als kaltes gefriert, was jedoch nicht als Mpemba-Effekt bezeichnet werden sollte. Denn diese Beobachtung basiert darauf, dass die inneren und äußeren Bedingungen des warmen und kalten Wassers nicht identisch sind oder das Ergebnis durch ungenaue oder punktuelle Messungen ebenfalls fehlerbehaftet ist.

8. Fazit

Nach vierjähriger Forschung sowie der steten Optimierung der experimentellen Genauigkeit der Durchführung konnten wir viele Erkenntnisse über den Gefrierprozess vom Wasser gewinnen. Es wurden mit Variationen zahlreicher Parameter und mit Berechnungen verschiedene Hypothesen untersucht. Die experimentellen und theoretischen Ergebnisse stimmen dabei weitestgehend miteinander überein.

Insgesamt wurden innerhalb dieser Arbeit keine Evidenzen für den Mpemba-Effekt gefunden. Das ursprünglich wärmere Wasser gefriert nicht schneller als das ursprünglich kältere, sofern das Gefrieren und die Messung unter den gleichen Bedingungen geschieht. Die finale These aus dem experimentellen und theoretischen Teil, dass der Mpemba-Effekt nur ein Scheineffekt ist, der aufgrund von Störungen der Rahmenbedingungen sowie von Messfehlern auftritt, lässt sich durch die Modellierung bestätigen, indem scheinbare Ursachen in die Simulationen künstlich eingebaut wurden und ein vermeintliches Auftreten des Mpemba-Effekts nachgewiesen wurde.

In Zukunft kann man mit Computern, die eine bessere Rechenfähigkeit besitzen, genauere Simulation des Gefrierprozesses sowie Experimente mit präziseren Instrumenten und hochwertigeren Ausstattungen durchführen. Beides ist jedoch derzeit im privaten und schulischen Kontext finanziell nicht möglich.

Unabhängig von seiner physikalischen Existenz bleibt der Mpemba-Effekt ein Beispiel für die Dynamik und Weiterentwicklung des Erkenntnisprozesses und besitzt nach wie vor einen hohen wissenschaftlichen Stellenwert [2][3]. Er demonstriert anhand seines Namensgebers, dass sorgfältige Beobachtung im Alltag unentbehrlich für die Forschung ist und fungiert zugleich als zeitloser Ansporn für wissenschaftliches Engagement.

Danksagung

Wir möchten unseren aufrichtigen Dank gegenüber Dirk Bittner aussprechen, der großzügige finanzielle Unterstützung aus dem Sponsorenpool Hessen von Jugend forscht e.V., finanziert durch die Wilhelm und Else-Heraeus-Stiftung, über die gesamte Forschungszeit zur Verfügung stellte. Besonderer Dank gilt auch der Goetheschule Neu-Isenburg für die finanzielle Hilfestellung über ihren Förderverein FFG sowie die Bereitstellung eines geeigneten Forschungsorts mit entsprechender Laborausstattung. Außerdem danken wir allgemeinen Sponsoren für die schulische Jugend-forscht-Gruppe wie dem Lions Club Neu-Isenburg.

Wir schätzen überaus die Unterstützung unseres Projektbetreuers, OStR Andreas Fäth, der junge Menschen durch sein unermüdliches Engagement und seinen Reichtum an Wissen in höchstem Maße inspiriert und uns mit Rat und Tat zur Seite stand. Wir danken der Jugend-forscht-Gruppe der Goetheschule, die uns teils handwerklich unterstützt und durchgehend eine angenehme Arbeitsatmosphäre gewährleistet hat.

Zudem danken wir der Stiftung Jugend forscht e.V. sowie den Jurymitgliedern auf allen Wettbewerbsebenen, die unserem Projekt über vier Jahre hinweg Anerkennung schenken und uns wertvolle Feedbacks gaben. Insbesondere gilt der Dank der Jury des Landeswettbewerbs Hessen 2025, die mit fachlichen Anregungen unsere Forschung weiter vorantrieb.

Quellen- und Literaturverzeichnis

Alle Quellen wurden zuletzt am 30. Juli 2026 abgerufen.

- [1] Mpemba, E.B., Osborne D.G. (1969). Cool? Physics Education. 4/172. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/4/3/312/pdf>
- [2] Bregovic, N. (2016). Mpemba effect from a viewpoint of an experimental physical chemist. Royal Society of Chemistry.
- [3] Burrige, H., Hallstadius, O. (2020). Observing the Mpemba effect with minimal bias and the value of the Mpemba effect to scientific outreach and engagement. The Royal Society Publishing. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2019.0829>
- [4] Schneider, J. (2016). Der Mpemba-Effekt und seine Ursache. Junge Wissenschaft. https://www.junge-wissenschaft.ptb.de/fileadmin/paper/bis_2017/pdf/juwi-110-2016-05.pdf
- [5] Wolstenholme-Hogg, P. (2012). The Mpemba Effect. Royal Society of Chemistry. <https://edu.rsc.org/feature/the-mpemba-effect/3007451.article>
- [6] Lübke, P. (2010). Untersuchung des Gefrierverhaltens von Wasser. Jugend forscht. <http://jugend-forscht-cgh.de/pdfs/2010-mpemba.pdf>
- [7] Dahlke, N., Perkovic, A. (2024). Mpæmba – Unterkühlung mit Gedächtnis?. Jugend forscht Südbaden. https://jugend-forscht-suedbaden.de/wp-content/uploads/2024/02/Jufo_2024_ProjekteWeb_Chemie_04-neu.pdf
- [8] Cherwell Archive (2008). The Mpemba Effect (continued). <https://cherwell.org/2008/02/10/the-mpemba-effect-continued/>

- [9] Eigenschaften des Wassers. Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Stand der Bearbeitung: 11.11.2023. https://de.wikipedia.org/wiki/Eigenschaften_des_Wassers
- [10] Kulke, U. (2012). Warum heißes Wasser schneller gefriert als kaltes. Welt. <https://www.welt.de/wissenschaft/article107290392/Warum-heisses-Wasser-schneller-gefriert-als-kaltes.html>
- [11] Tier, R. (2022). Mpemba Effect Demystified. Engineering Archives. <https://engrxiv.org/preprint/view/2104/4198>
- [12] Mann, A. (2022). Friert heißes Wasser schneller als kaltes?. Spektrum. <https://www.spektrum.de/news/mpemba-effekt-friert-heisses-wasser-schneller-als-kaltes/2054358>
- [13] Altnau, S. (2021). Verkehrte Welt - der faszinierende Mpemba-Effekt. DWD. https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2021/2/19.html
- [14] Reinartz, T. (2020). Physik zum Anfassen: Der Mpemba-Effekt. DWD. https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2020/4/23.html
- [15] Ibekwe, R., Cullerne, J. (2016). Investigating the Mpemba Effect: when hot water freezes faster than cold water. IOP Science. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/51/2/025011>
- [16] Jeng, M. (2005). Hot water can freeze faster than cold?!. History and Philosophy of Physics. <https://arxiv.org/pdf/physics/0512262>
- [17] Jin, J., Goddard, W. (2015). Mechanisms Underlying the Mpemba Effect in Water from Molecular Dynamics Simulations. The Journal of Physical Chemistry C. ACS Publications. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp511752n>
- [18] Auerbach, D. (1995). Supercooling and the Mpemba effect: When hot water freezes quicker than cold. American Journal of Physics. <https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article-abstract/63/10/882/1038551/Supercooling-and-the-Mpemba-effect-When-hot-water>
- [19] Auerbach, D. (1996). Wasser, Eis und der Mpemba-Effekt. Spektrum der Wissenschaft 4/1996.
- [20] Burridge, H.C., Hallstadius, O. (2016). Questioning the Mpemba effect: hot water does not cool more quickly than cold. Scientific Reports. <http://dx.doi.org/10.1038/srep37665>
- [21] Savitsky, Z. (2026). The Mpemba effect goes quantum. Science 391 (6792). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aeh4838>
- [22] Chaddah P., Dash S., Kumar K. and Banerjee A. (2010). Overtaking while approaching equilibrium. UGC-DAE Consortium for Scientific Research.
- [23] Brownridge, J.D. A search for the Mpemba effect: When hot water freezes faster then cold water. State University of New York at Binghamton.
- [24] Gurevich, S. (2017). Aus Skript Wintersemester 2016/2017: Advektionsgleichung. Universität Münster, Institut für Theoretische Physik. https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/physik_tp/lectures/ws2016-2017/num_methods_i/advection.pdf unter https://www.uni-muenster.de/Physik.TP/teaching/courses/numerical_methods_for_complex_systems_i_ws2016-2017.html
- [25] Gurevich, S. (2017). Aus Skript Wintersemester 2016/2017: Diffusionsgleichung. Universität Münster, Institut für Theoretische Physik. https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/physik_tp/lectures/ws2016-2017/num_methods_i/heat.pdf
- [26] Barba Group. CFDPython. GitHub. <https://github.com/barbagroup/CFDPython?tab=readme-ov-file>
- [27] Barba Group. Numba (Kapitel 4). Essential Skills for Scientific Computing. https://barbagroup.github.io/essential_skills_RRC/numba/4/
- [28] The Visual Room. Poisson equation for pressure. http://thevisualroom.com/poisson_for_pressure.html
- [29] Ceyron. Lid-driven cavity simulation. GitHub. https://github.com/Ceyron/machine-learning-and-simulation/blob/main/english/simulation_scripts/lid_driven_cavity_python_simple.py
- [30] Strang, Gilbert. (2006). Advanced computational mathematics (18.086). Massachusetts Institute of Technology. <https://math.mit.edu/classes/18.086/2006/am54.pdf>
- [31] MIT. (2015). Lecture 18: Numerical methods for fluid mechanics (2.29). Massachusetts Institute of Technology. https://ocw.mit.edu/courses/2-29-numerical-fluid-mechanics-spring-2015/16669ec637efae8468b8a85049bfba8_MIT_29S15_Lecture18.pdf
- [32] Chasnov, Jeffrey R. (2022). Numerical methods for engineers (ab S. 149). Hong Kong University of Science and Technology. <https://www.math.hkust.edu.hk/~machas/numerical-methods-for-engineers.pdf>
- [33] SciPy Community. The two-dimensional advection equation (Kapitel 7, Problem 7.2). SciPython. <https://scipython.com/book/chapter-7-matplotlib/problems/p72/the-two-dimensional-advection-equation/>
- [34] Heinkenschloss, Matthias (2010). Gaussian elimination. Rice University, CAAM 335. https://www.cmor-faculty.rice.edu/~zhang/caam335/F14/handouts/gaussian_elimination.pdf
- [35] Saad, Tony (2019). Navier-Stokes Solver using Finite Differences. GitHub/University of Utah. <https://github.com/saadtony/uCFD/blob/master/Navier%20Stokes%20Finite%20Difference%20Method.ipynb>
- [36] MIT Advection schemes. MIT General Circulation Model (MITgcm). <https://mitgcm.readthedocs.io/en/latest/algorithm/adv-schemes.html>
- [37] Clark, James R. (2018). Lateral advection-diffusion: Analytic solution example. PyLag Documentation. https://pylag.readthedocs.io/en/latest/examples/lateral_adv_diff_analytic.html
- [38] Quizlet. Start with the two-dimensional continuity equation and the Navier-Stokes equations and verify the nondimensional forms of these equations. Latex image. https://d2nchlq0f2u6vy.cloudfront.net/20/10/31/a9c-9440bfdca33631d881724517ca6b0/5070df4116ae7c0c4770d9720f5f69bd/lateximg_large.png unter <https://quizlet.com/explanations/questions/start-with-the-two-dimensional-continuity-equation-and-the-navier-stokes-equations-and-verify-the-nondimensional-forms-of-these-equations-b90c1346-57dcae8a-ee4e-475d-9fed-008a00e9daaa>
- [39] Toumi, Younes (2021). Heat equation 1D [Python-Skript]. GitHub. <https://github.com/Younes-Toumi/YouTube-Channel/blob/main/Simulation%20with%20Python/Heat%20Equation/heatEquation1D.py>
- [40] Hydroskript. (2015). Hydrologisches Kompendium, Abschnitt 3.1: Grundlagen der Hydrologie. Webarchivierte Version. <https://web.archive.org/web/20150924032019/http://www.hydroskript.de/html/index.html?page=/html/hykp0301.html>
- [41] Science and Fun. Dichte von Wasser. <https://wissen.science-and-fun.de/tabellen-zur-chemie/dichtetabellen/dichte-von-wasser/>
- [42] Schott. DURAN® Technical Data. <https://media.schott.com/api/public/content/b5e2b351affc45259c0b3f41d48abb78?v=e6464fab>
- [43] Hilgenberg GmbH. Technisches Datenblatt Glass 0100. https://www.hilgenberg-gmbh.de/fileadmin/user_upload/PDF/HIL_Datenblatt_DE_0100_0522.pdf
- [44] Netzsch. Polystyrol - Allgemeine Eigenschaften. <https://analyzing-testing.netzsch.com/de/polymere-netzsch-com/commodity-thermoplastics/ps-Polystyrol>

Als Schüler*in wissenschaftlich publizieren

Wie auch aus deiner Wettbewerbsarbeit eine zitierfähige Veröffentlichung wird

Was ist eine wissenschaftliche Veröffentlichung?

Wissenschaftliche Publikationen, sogenannte Papers, sind ein zentrales Element wissenschaftlichen Arbeitens. In Papers werden nicht nur Zeitpunkt und Stand einer Erkenntnis öffentlich dokumentiert, sondern auch mit der Wissenschafts-Community geteilt. So lässt man Kolleg*innen derselben Fachrichtung an Ergebnissen teilhaben oder zeigt progressive Forschungsansätze auf.

Was kostet die Veröffentlichung?

Für die Autor*innen fallen keinerlei Veröffentlichungsgebühren (*page charges*) an. Alle Kosten z. B. für Redaktion, Lektorat, Layout, Website und App tragen Verlag und Sponsoren. Verlag ist die Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, die das Projekt seit Gründung begleitet.

Was ist besonders an einer wissenschaftlichen Veröffentlichung?

Die Besonderheit eines echten, wissenschaftlichen Papers ist, dass es *peer reviewed* ist. Der Begriff setzt sich zusammen aus den englischen Wörtern *peer* für „Kolleg*in“ und *reviewed* für „überprüft“ (*review* = die Überprüfung). Die Arbeit wird also von einem / einer meist anonymen Fachkolleg*in, der oder dem *referee*, auf Schlüssigkeit überprüft. Die Arbeit ist somit gecheckt und kann als Basis für weitere Forschungsvorhaben genutzt werden.

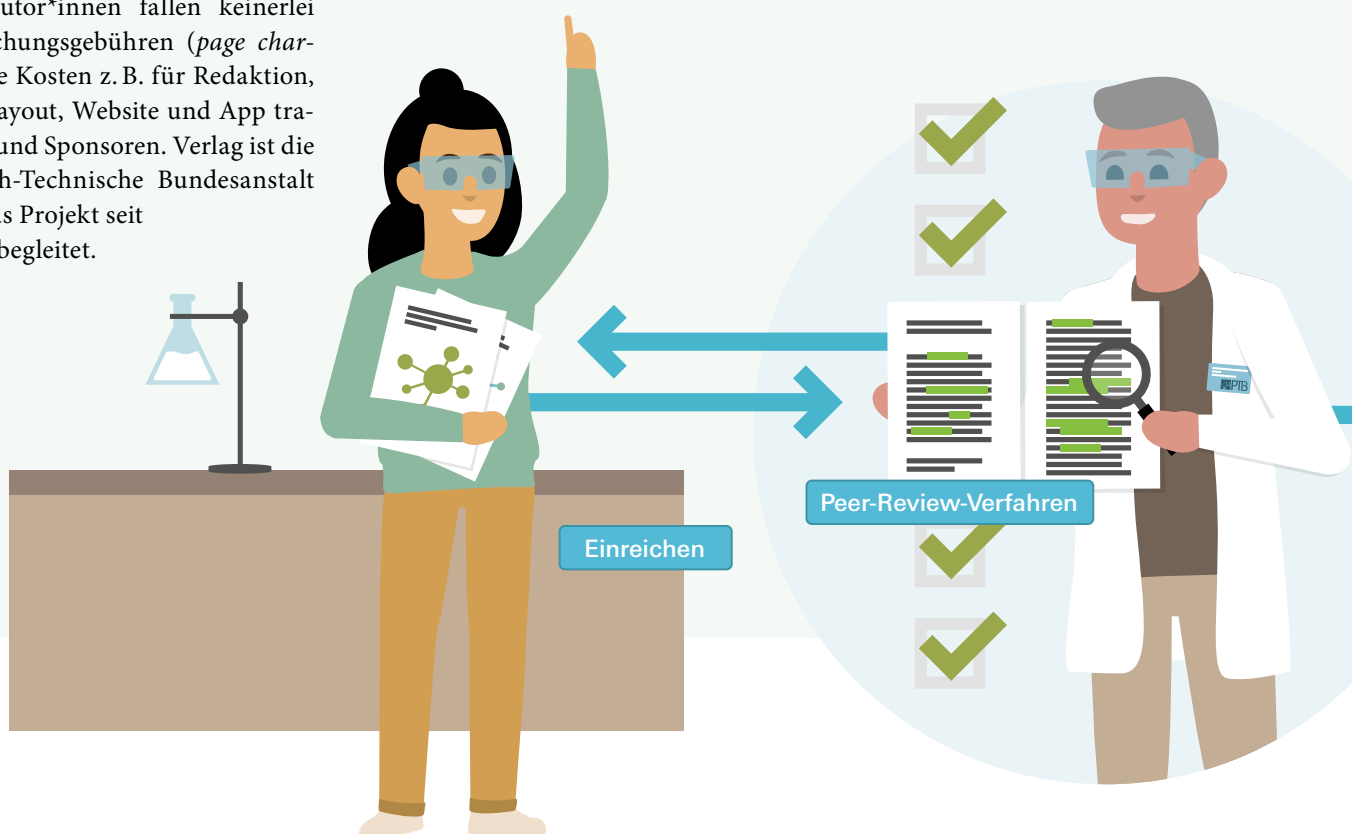


Hast du Fragen? In den FAQs auf der Seite „Für Autor*innen“ findest du Antworten.

www.junge-wissenschaft.ptb.de/fuer-autorinnen

Wieso wissenschaftlich publizieren?

Papers dienen nicht nur dem fachlichen Austausch, die Publikationsliste zeigt – ähnlich wie ein Lebenslauf – den fachlichen Werdegang von Forschenden und dokumentiert Erfolge im jeweiligen Spezialgebiet.



Wie geht das und wie viel Arbeit muss ich investieren?

Die Junge Wissenschaft (JuWi) ist die einzige Plattform, auf der bereits Schüler*innen ein erstes Paper, *peer reviewed*, veröffentlichen können. Das von der JuWi-Chefredaktion eingeleitete und begleitete Peer-Review-Verfahren macht aus deinem Wettbewerbsbeitrag eine zitierfähige Veröffentlichung. Ein JuWi-Paper ist der Startschuss für deine persönliche Veröffentlichungsliste. Und als erfolgreiche Teilnehmer*in eines Forschungswettbewerbs hast du den Löwenanteil der Arbeit bereits erledigt.

Sende deine Arbeit und die Erstveröffentlichungserklärung an:

Chefredaktion Junge Wissenschaft

Dr.-Ing. Sabine Walter
Paul-Ducros-Straße 7
30952 Ronnenberg

Tel: 05109 / 561508
Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de



Wie geht es nach dem Einreichen weiter?

Die Chefredakteurin sucht einen geeigneten Fachgutachter*in, der bzw. die, die inhaltliche Richtigkeit der eingereichten Arbeit überprüft und eine Empfehlung ausspricht, ob sie veröffentlicht werden kann (Peer-Review-Verfahren). Das Gutachten wird dir zugeschickt und du erhältst die Möglichkeit, Hinweise des oder der Fachgutachter*in oder eigene Änderungen einzuarbeiten. Die Erfahrung zeigt, dass Arbeiten, die z. B. im Rahmen eines Wettbewerbs wie Jugend forscht die Endrunde erreicht haben, die besten Chancen haben, dieses Peer-Review-Verfahren zu bestehen. Bis hierhin hast du keinerlei Arbeit investiert.

Schließlich kommt die Arbeit in die Redaktion, wird für das Layout vorbereitet und nach der Freigabe als Open-Access-Beitrag, also für jedermann zugänglich, veröffentlicht.

Was bringt es mir?

JuWi-Autor*innen erwerben in der engen Zusammenarbeit mit der Redaktion Kenntnis über den Aufbau einer wissenschaftlichen Arbeit, über wissenschaftlichen Schreibstil, worauf zu achten ist und welche Schritte wann notwendig sind. Autor*innen eines JuWi-Papers haben so sehr früh einen bedeutenden Teil wissenschaftlichen Publizierens erlernt, noch bevor sie an die Hochschule gehen.

Impressum

Junge Wissenschaft

c/o Physikalisch-Technische
Bundesanstalt (PTB)
www.junge-wissenschaft.ptb.de

Redaktion

Dr.-Ing. Sabine Walter,
Chefredaktion Junge Wissenschaft
Paul-Ducros-Str. 7
30952 Ronnenberg
E-Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de
Tel.: 05109 / 561 508



Sabine Siems, Verlag
E-Mail: sabine.siems@ptb.de
Tel.: 0531 / 592 8202



Design & Satz

Sebastian Baumeister
Art Director / stilsicher.design
E-Mail: baumeister@stilsicher.design
Tel.: 05142 / 302 99 04



Verlag

Dr. Dr. Jens Simon,
Pressesprecher der PTB
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
E-Mail: jens.simon@ptb.de
Tel.: 0531 / 592 3006
(Sekretariat der PTB-Pressestelle)



