

Trinkwasserdesinfektion auf Reisen: Ein Update für die reisemedizinische Beratung

Drinking water disinfection for travelers: an update for pre-travel counseling

Autorin

Lisa F. Timmermann

Institut

Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, RWTH Aachen

Key words

drinking water disinfection – field water treatment

Bibliografie

DOI 10.1055/a-1008-6294

Korrespondenzadresse

Dr. med. Lisa F. Timmermann

Medizinische Fakultät der RWTH Aachen

Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin

Pauwelsstr. 30, 52074 Aachen

E-Mail: Lisa.Timmermann@rwth-aachen.de

ZUSAMMENFASSUNG

In Regionen ohne kommunale Wasseraufbereitung sind Reisende auf eine eigenständige Desinfektion ihres Trinkwassers angewiesen. Hierzu steht eine Vielzahl sowohl altbewährter als auch innovativer Methoden zur Verfügung, von denen jede Stärken und Schwächen aufweist. Die Güte des Desinfektionsergebnisses unterliegt dem Einfluss

zahlreicher Umweltfaktoren und nicht jede Methode eignet sich gleichermaßen für alle Reisekonzepte und Reiseregionen. Dies macht die Trinkwasserhygiene in der reisemedizinischen Beratung zu einem komplexen Thema. Der vorliegende Artikel liefert einen Überblick über die aktuell gebräuchlichen Methoden der Trinkwasserdesinfektion auf Reisen mit besonderem Fokus auf Wirkmechanismen und Einflussfaktoren. Im Anschluss wird ein Leitfaden für die Beratung Reisender zur Auswahl einer geeigneten Methode und Vermeidung von Fehlern bei deren Anwendung vorgeschlagen.

ABSTRACT

In regions without access to safe communal drinking water supply travelers are responsible for disinfecting their own raw water. For this purpose a wide variety of time-tested as well as innovative methods are available, each of which having strengths and weaknesses. The quality of disinfection is subject to various environmental influences and not every method is equally suitable for all travel concepts and destinations. This makes drinking water hygiene a complex topic in a pre-travel medical consultation. The present paper provides an overview of the different methods currently in use with a special focus on the respective modes of action and influencing factors. This is followed by a recommendation for counseling travelers regarding the selection of a suitable method as well as the avoidance of frequent pitfalls.

Hintergrund

Kontaminiertes Trinkwasser ist die Quelle zahlreicher durch Mikroorganismen übertragener Erkrankungen. Allen voran steht hierbei die Reisediarrhö, deren Inzidenz in Entwicklungsländern bis zu 90 % betragen kann (bezogen auf einen 2-wöchigen Aufenthalt) [1]. Die Erkrankung beeinträchtigt nicht nur das subjektive Wohlbefinden, sie kann auch mit schwerwiegenden Komplikationen einhergehen (z. B. akutes Nierenversagen, septische Verläufe, Abszedierung, Chronifizierung). Darüber hinaus besteht das Risiko weiterer trinkwasserassoziierter Erkrankungen wie zum Beispiel Hepatitis A, Typhus oder Poliomyelitis [2].

Das Erregerspektrum der Reisediarrhö umfasst Bakterien (50–80 %), Viren (5–25 %) und Protozoen (< 10 %) [3]. Der weltweit am häufigsten nachgewiesene Keim ist ETEC (enterotoxischer *E. coli*) [4]. Weitere wichtige darmpathogene Bakterienspezies sind *Campylobacter*, *Salmonellen*, *Shigellen* und *Vibrio cholerae*. Bei viral bedingten

Durchfallerkrankungen stehen Noro- und Rotaviren im Vordergrund. Protozoen wie *Giardia lamblia* und Kryptosporidien sind zwar deutlich seltener vertreten, jedoch verursachen sie mitunter schwerere und langwierigere Verläufe. Für Wurmerkrankungen spielt die Übertragung durch Trinkwasser eine eher untergeordnete Rolle [5], mit Ausnahmen wie *Dracunculus medinensis* (Medinawurm) [6] oder *Fasciola hepatica* (Leberegel) [7]. Auch sporenbildende Bakterien zählen nicht zu den primär relevanten Trinkwasserkeimen, sondern werden hauptsächlich durch Schmierinfektion und kontaminierte Nahrungsmittel übertragen [5].

Mittlerweile existiert eine große Vielfalt an Verfahren zur individuellen Trinkwasseraufbereitung. Jedes weist sowohl Stärken als auch Schwächen auf und die Wirksamkeit wird durch zahlreiche Umweltfaktoren beeinflusst. Dies macht die Trinkwasserhygiene zu einem komplexen Thema. Ein 2010 publizierter Übersichtsartikel von Flörchinger lieferte bereits einen guten Überblick über verschiedene Auf-

bereitungsmethoden [8]. Auf internationaler Ebene stehen die Empfehlungen der UIAA als Grundlage für eine Beratung zur Verfügung [9]. Der Markt für das entsprechende Equipment zeigt jedoch eine beachtliche Dynamik. So wurden in den letzten Jahren Verfahren, die sich in großtechnischen Anlagen auf kommunaler Ebene bewährt haben, in Form kleiner, mobiler Geräte der Nutzung auf Reisen zugänglich gemacht. Darüber hinaus gibt es Entwicklungen, die durch den Einsatz von Nanotechnologie neue Materialien mit verschiedenen Oberflächeneigenschaften zur Filtration oder Katalyse von Desinfektionsprozessen hervorbringen. Diese innovativen Verfahren sind zwar bislang noch wenig verbreitet, werden allerdings zunehmend auf dem Markt beworben. Unabhängig davon bestehen unter Reisenden teilweise gravierende Wissenslücken bezüglich der Trinkwasserhygiene [10], was Anlass zur Verfassung eines Updates speziell im Hinblick auf die reisemedizinische Beratung gab. Im Folgenden werden die verschiedenen Methoden vorgestellt und ein Leitfaden für die praxisorientierte reisemedizinische Beratung vorgeschlagen.

Chemische Verfahren

Halogene – Chlor und Jod

Das Prinzip der chemischen Desinfektion beruht auf einer Denaturierung lebenswichtiger Zellstrukturen des Mikroorganismus durch Oxidation. Die Klassiker unter den chemischen Verfahren sind chlor- und jodbasierte Desinfektionsmittel, die als Tabletten oder in Tropfenform erhältlich sind. In den üblichen Dosierungen weisen beide Halogene eine ähnlich gute Wirksamkeit auf [11]. Jodprodukte sind jedoch in Europa aufgrund gesundheitlicher Bedenken (insbesondere im Hinblick auf Störungen der Schilddrüsenfunktion) nicht zugelassen, weshalb auch die WHO diese nicht mehr als Desinfektionsmittel der ersten Wahl empfiehlt [12]. Daher wird hierauf im Folgenden nicht näher eingegangen.

Spricht man von „Chlorprodukten“, ist es wichtig, zwischen 2 verschiedenen Substanzgruppen zu unterscheiden:

- Chlorverbindungen, die bei Wasserkontakt hypochlorige Säure (HOCl) bilden, welche die eigentliche Wirksubstanz darstellt. Hierzu zählen z. B. Natrium- und Kalziumhypochlorit sowie Natriumdichlorisocyanurat (NaDCC = Wirkstoff des hierzulande verbreiteten Produkts Micropur® forte).
- Chlordioxid (ClO_2), welches im Wasser als gelöstes Gas in seiner chemischen Struktur erhalten bleibt. Es hydrolysiert also nicht zu hypochloriger Säure und entfaltet seine oxidierende Wirkung als molekulares freies Radikal (Produktbeispiel Aquamira®).

Die Differenzierung zwischen HOCl-Bildnern und Chlordioxid ist von praktischer Relevanz, da sie verschiedene

Wirkeigenschaften besitzen. Außerdem unterscheiden sie sich in ihrer Anfälligkeit gegenüber Umwelteinflüssen. Vereinfacht dargestellt liegt der zentrale Unterschied der Wirkmechanismen in der Art der Oxidation begründet: Während HOCl-Bildner Chloratome auf organische Moleküle übertragen, oxidiert Chlordioxid seine Reaktionspartner lediglich über die Aufnahme von Elektronen, das heißt es erfolgt keine Chlorierung anderer Substanzen [13]. Erst seit einigen Jahren ist es möglich, ClO_2 für den mobilen Gebrauch in Tabletten-/Tropfenform herzustellen.

Die entscheidenden Variablen für die Wirksamkeit der chemischen Desinfektion sind Dosis und Einwirkzeit. Je höher die Dosis, desto kürzer die notwendige Einwirkzeit und umgekehrt. Allerdings erkaufte man sich durch Zugabe höherer Dosen eine Geschmacks-/Geruchsbeeinträchtigung. Bei HOCl-Bildnern liegt die empfohlene Einwirkzeit je nach Produkt im Bereich von 30 Minuten, bei Chlordioxid sind abhängig von der Wasserqualität 15 Minuten ausreichend [11]. Hierbei spielt jedoch die Wassertemperatur eine entscheidende Rolle. Da chemische Reaktionen bei niedrigeren Temperaturen langsamer ablaufen, muss die Einwirkzeit in kaltem Wasser verlängert werden (Verdopplung der notwendigen Einwirkzeit pro Temperaturabnahme um 10°C) [9]. Außerdem wird die Wirksamkeit durch den pH-Wert des Wassers beeinflusst. Die Bildung von HOCl ist pH-abhängig, je nach pH-Wert bildet sich ein chemisches Gleichgewicht zwischen hypochloriger Säure und ihrem Salz Hypochlorit (ClO^-). Das Wirkoptimum der Desinfektion mit HOCl-Bildnern liegt im neutralen bis leicht sauren Bereich ($\text{pH} < 7,5$), da hier der Hauptanteil der Chloratome in Form von hypochloriger Säure vorliegt [14]. Bei höheren pH-Werten verschiebt sich das Gleichgewicht hin zu Hypochlorit, welches zwar ebenfalls mikrobizid wirksam aber deutlich weniger effektiv ist. Oberhalb eines pH-Wertes von 8,5 besteht praktisch keine Wirksamkeit mehr [14]. Bei sehr niedrigem pH entsteht wiederum Chlorgas (Cl_2), welches sich aus der wässrigen Lösung verflüchtigen kann [15]. Die Desinfektion mit Chlordioxid ist dagegen deutlich weniger pH-abhängig. Bis zu einem pH-Wert von 9 ist die Wirksamkeit nicht beeinträchtigt [14]. Ein weiterer Einflussfaktor ist der Grad der organischen Verunreinigung. Chloratome werden durch organische Substanzen verbraucht und stehen somit nicht mehr der Abtötung von Keimen zur Verfügung („Chlorzehrung“). Im Falle der HOCl-Bildner entstehen hierbei chlorierte Desinfektionsbeiprodukte (z. B. Chloramine, Chloroform), die die Geschmacks-/Geruchsqualität des Wassers negativ beeinflussen („schwimmbadartig“). Daher sollte augenscheinlich verunreinigtes Wasser vorfiltriert werden. Chlordioxid ist weniger anfällig für Chlorzehrung, da es deutlich selektiver reagiert und keine chlorierten Beiprodukte bildet [16]. Im Gegenteil hat ClO_2 durch die Oxidation geruchsbildender Substanzen sogar desodorierende Eigenschaften.

Alle Chlorprodukte sind anfällig für Umwelteinflüsse. So können Luftkontakt, Feuchtigkeit, UV-Exposition



► **Abb. 1** Produktbeispiel elektrolytische Desinfektion.

Quelle: Wisconsin Pharmacal Company



► **Abb. 2** Produktbeispiel Ozonpen.

Quelle: Roving Blue®

und Wärme die Wirksamkeit von Tropflösungen und Tabletten herabsetzen oder sogar aufheben [17]. Dies ist insbesondere bei Chlordioxid der Fall. Daher bieten reine Chlorprodukte unter den üblichen Bedingungen auf Reisen keinen langfristigen Schutz vor einer Rekontamination, da sich die Substanzen durch die oben genannten Faktoren verflüchtigen beziehungsweise abgebaut werden.

Die chemische Desinfektion ist effektiv gegen alle trinkwasserrelevanten Bakterien und Viren. Jedoch besteht gegen Protozoen und Wurmeier nur eine eingeschränkte Wirksamkeit. Für die Abtötung von *Giardia lamblia* ist eine verlängerte Einwirkzeit von ≥ 2 Stunden oder eine Dosiserhöhung erforderlich. Gegen Kryptosporidien ist in praktikablen Dosierungen und Einwirkzeiten ausschließlich Chlordioxid sicher wirksam, wobei hierfür die Einwirkzeit je nach Wassertemperatur auf bis zu 4 Stunden verlängert werden muss [11].

Elektrolytische Desinfektion

Wird mittels zweier Elektroden eine elektrische Spannung an eine Salzlösung (NaCl) angelegt, entsteht durch Elektrolyse ein Gemisch oxidativ wirksamer Substanzen, unter anderem hypochlorige Säure (sog. „mixed oxidant solution“) [14]. Dieses Gemisch weist eine mikrobizide Wirksamkeit auf, welche über die von HOCl hinausgeht. Neben der Anwendung in größeren Anlagen existieren mittlerweile auch kleine batteriebetriebene Geräte zur Herstellung einer solchen Lösung, die das Verfahren auf Reisen nutzbar machen. Wirkmechanismus und Einflussfaktoren entsprechen denen der oben genannten Halogene. Auch das Wirkspektrum ist vergleichbar, wobei für die Inaktivierung von Kryptosporidien eine Dosierungskontrolle erfolgen sollte und die Einwirkzeit auf 4 Stunden zu verlängern ist (Beispiel Potable Aqua® PURE™) (► Abb. 1) [18].

Ozon

Ozon (O_3) ist ein instabiles Molekül, das bei Raumtemperatur zu O_2 und atomarem Sauerstoff zerfällt. Letzterer ist hochreaktiv und besitzt eine starke Oxidationswirkung [14]. Ozon wird schon lange in der kommunalen Wasseraufbereitung eingesetzt. Erst seit kurzer Zeit findet die Technologie auch Einzug in den Markt für Reiseequipment. Ein Produktbeispiel ist der RovingBlue® O-PEN™, ein akkubetriebenes Handgerät, das über Elektroden im Wasser Ozongas erzeugt (► Abb. 2). Dieses tritt in Form einer Wolke kleiner Bläschen aus dem Pen aus und wird durch Rühren vermischt. Der Vorgang dauert weniger als 2 Minuten für 0,5 Liter Wasser, anschließend ist eine Einwirkzeit von 5 Minuten einzuhalten. In dieser Zeit entfalten die Ozonmoleküle ihre oxidierende Wirkung, wodurch nicht nur Mikroorganismen sondern auch Geschmacks-/Geruchsstoffe abgebaut werden. Neben den Abbauprodukten der oxidierten Zielstrukturen entsteht hierbei lediglich 2-atomiger Sauerstoff. Bislang existieren jedoch keine unabhängigen Studien zu dem Produkt und die oben beschriebenen Charakteristika beziehen sich auf Herstellerangaben [19].

Silber

Silberionen haben einen sowohl bakteriostatischen als auch bakteriziden Effekt, welcher als Oligodynamie bezeichnet wird und vielfältige Angriffspunkte umfasst. Unter anderem bewirken die positiv geladenen Ionen eine Destabilisierung von Membranen und interferieren mit den Cytochromen der Atmungskette, was die Bildung von Sauerstoffradikalen zur Folge hat [20]. Diese üben oxidativen Stress auf die Zelle aus. Jedoch ist die desinfizierende Wirkung von Silber eher langsam und das Wirkspektrum eingeschränkt. Daher sind reine Silberprodukte für die Trinkwasserdesinfektion nicht geeignet. Der primäre Nutzen von Silber liegt in der Konservierung sauberen Wassers. Durch die Präsenz von Silberionen wird eine Rekontamination zuvor anderweitig aufbereiteten Wassers verhindert, wodurch eine Haltbarkeit von 6 Monaten erzielt werden kann [21].

Physikalische Verfahren

Thermische Desinfektion

Prinzipiell lassen sich durch Hitze alle Arten von Mikroorganismen zuverlässig abtöten. Entscheidend sind hierbei die Temperatur und die Dauer der Hitzeeinwirkung. Obwohl verschiedene Spezies unterschiedliche Resistenzniveaus aufweisen, sterben bei 100 °C feuchter Hitze Bakterien, Viren, Protozoen und Helminthen innerhalb von Sekunden bis wenigen Minuten ab [22]. Ausnahme sind sporenbildende Bakterien, die jedoch wie oben erwähnt nicht zu den primär trinkwasserrelevanten Keimen zählen. Bei geringeren Temperaturen kann durch eine Verlängerung der Einwirkzeit ebenfalls eine adäquate Desinfektion erzielt werden (Prinzip der Pasteurisierung). So ist Wasser, welches über 30 Minuten konstant bei einer Wassertemperatur von über 65 °C gehalten wird, als sicher anzusehen [11]. Bei > 80 °C genügt für die meisten Erreger weniger als eine Minute, wodurch selbst das äußerst hitzeresistente Hepatitis-A-Virus inaktiviert werden kann [23]. Im Gelände stellt die Blasenbildung beim Kochen jedoch häufig die einzig sichere Methode einer Temperaturbestimmung dar. Daher wird empfohlen, das Wasser einmal sprudelnd aufzukochen [5]. Hierdurch ist die Dauer der Hitzeeinwirkung > 80 °C ausreichend lang, um eine zuverlässige Abtötung aller relevanten Keime zu gewährleisten. Es ist zu beachten, dass die Siedetemperatur mit zunehmender Höhe abnimmt (1 °C pro 300 Hm), so dass die Kochzeit gegebenenfalls verlängert werden muss (Beispiel: Siedetemperatur am Mt. Everest Base Camp auf 5360 Hm etwa 82 °C).

Filtration

Bei der Filtration wird die Desinfektion nicht durch Abtötung, sondern durch eine mechanische Entfernung der Keime aus dem Wasser erzielt. Die entscheidenden Variablen sind die Porengröße sowie die Oberflächenbeschaffenheit des Filtermaterials. Die Materialien, die hierbei zum Einsatz kommen, sind vielfältig und werden teilweise innerhalb eines Produkts miteinander kombiniert. Das Wasser wird je nach Produktgestaltung mittels Sog oder Druck durch die Filtereinheit befördert (► Abb. 3). Mikrofilter guter Qualität aus Keramik oder Glasfaser weisen eine Porengröße von 0,2 µm auf, wodurch sowohl Protozoen (1 µm–2 mm) als auch Bakterien (0,5–5 µm) entfernt werden [14]. Gegen Viren (0,025–0,3 µm) sind solche Filter jedoch nur begrenzt wirksam. Mittlerweile existieren einige Arten von Hohlfaserfiltern, deren Porendurchmesser nur 0,02 µm beträgt (Ultrafilter), womit selbst Viren zuverlässig eliminiert werden können. Hierbei wird das Wasser – ähnlich dem Prinzip der Dialyse – durch die semipermeable Membran eines Bündels feinsten Filterfasern gepresst. Jedoch weisen nicht alle Produkte dieser Kategorie derart kleine Poren auf. Filtermaterialien mit adsorbierenden Eigenschaften wie zum Beispiel Aktivkohle sind teilweise auch in der Lage, Toxine und Chemikalien aus dem Wasser zu entfernen.



► **Abb. 3** Beispiele verschiedener Filtertypen: Handpumpenfilter mit Kombielement aus Keramik, Glasfaser und Aktivkohle (links); Hohlfaserfilter (schematische Darstellung und Produktbeispiel eines aufschraubbaren Mundstückfilters) (Mitte); Schwerkraftfilter mit Reservoirbeutel (rechts).
Quelle: Katadyn und Sawyer

Filter sind je nach Material fragil und müssen vor starken Erschütterungen geschützt werden. Außerdem dürfen sie nicht einfrieren, wenn noch Wasserrückstände enthalten sind, da hierdurch Mikrorisse entstehen können. Eine Abnahme des notwendigen Filtrationsdrucks kann zwar auf eine solche Beschädigung hinweisen, jedoch ist ein Wirksamkeitsverlust in vielen Fällen für den Anwender nicht unmittelbar ersichtlich. Alle Filter können mit der Zeit verstopfen und müssen regelmäßig gereinigt oder ausgetauscht werden. Stark verunreinigtes Wasser beschleunigt diesen Vorgang, weshalb trübes Wasser grob vorfiltriert oder dekantiert werden sollte. Bei einigen Filtertypen kann ein erhöhter Filtrationsdruck beziehungsweise verlangsamter Wasserfluss auf die Notwendigkeit einer Wartung der Filtereinheit hinweisen. Bei anderen, insbesondere adsorbierenden Filtern, gibt es jedoch keinerlei Anhalt für einen graduellen Wirksamkeitsverlust durch Sättigung der Bindungsstellen, weshalb der Nutzer das bereits filtrierte Volumen im Blick behalten muss, um das Filterelement gemäß Herstellerangabe nach einer gewissen Anzahl an Litern auszutauschen. Zudem ist darauf zu achten, dass die saubere Seite des Filters nicht durch Schmutz oder unbehandeltes Wasser kontaminiert wird.

Seit einigen Jahren gibt es zunehmend neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Nanotechnologie. Durch die Beschichtung von Filtern mit Nanokompositen kann eine Oberflächenfunktionalisierung erzielt werden, die je nach Substanz adsorbierende, katalytische oder mikrobizide Eigenschaften besitzt [24]. Zudem kommt es durch den Einsatz von Nanopartikeln zu einer signifikanten Vergrößerung der funktionellen Oberfläche. Beispiele sind der Water-to-go™-Filter, der als Mundstück in eine Flasche integriert ist, sowie die Select-Serie von Sawyer, wobei es sich um flexible Silikonflaschen handelt, die einen nanokompositbeschichteten Schwamm enthalten. Die Hersteller machen allerdings keine genaueren Angaben zur exakten Zusammensetzung



► **Abb. 4** Produktbeispiel UVC-Desinfektion.

Quelle: Katadyn



► **Abb. 5** Anwendung des SODIS-Verfahrens in Indonesien.

Quelle: Eawag

der Nanokomposite und bislang existieren noch keine unabhängigen Studien zu solchen Produkten.

UVC-Desinfektion

Die Desinfektion mittels UVC-Strahlung fand bereits Mitte des 20. Jahrhunderts breiten Einzug in die kommunale Wasseraufbereitung. Mittlerweile sind jedoch auch handliche batteriebetriebene Geräte für Reisende verfügbar. Ein Beispiel hierfür ist der SteriPEN®, welcher einen Liter Wasser innerhalb von 90 Sekunden durch Bestrahlung desinfiziert (► Abb. 4). Die generelle Wirksamkeit des Gerätes konnte bereits in einer unabhängigen Studie validiert werden [25].

UVC-Strahlung von Wellenlängen um 260 nm bewirkt eine Schädigung der mikrobiellen DNA/RNA, insbesondere durch Induktion einer Dimerisierung nebeneinanderliegender Pyrimidinbasen [26]. Hierdurch verliert der Mikroorganismus zunächst seine Teilungsfähigkeit und stirbt letztendlich ab. Das Wasser muss absolut klar sein, da enthaltene Schwebstoffe die UV-Strahlen absorbieren.

Zudem ist es von entscheidender Bedeutung, das Wasser während der Bestrahlung in Bewegung zu halten, da sonst nicht alle Mikroorganismen erfasst werden. Da das Gerät eine Energiequelle benötigt (je nach Modell Batterien oder integrierter Akku), müssen Ersatzbatterien mitgeführt werden (Wechsel je nach Batterietyp alle 50–150 l) oder eine Stromquelle in regelmäßigen Abständen zur Verfügung stehen (alle 20–50 l).

Die UVC-Desinfektion ist gegen alle Arten von Mikroorganismen wirksam, wobei sich die Erreger in ihrer Strahlensensibilität unterscheiden [27]. Bakterien und Protozoen sind relativ empfindlich, während Viren und bakterielle Sporen eine höhere Resistenz aufweisen [28]. Testungen des SteriPEN® gegen Surrogatkeime lassen jedoch darauf schließen, dass das Gerät bei korrekter Anwendung gegen die primär relevanten Trinkwasserkeime wirksam ist [25].

Solare Desinfektion und Fotokatalyse

Die solare Desinfektion (SODIS) wird vor allem in Entwicklungsländern angewendet, kann aber auch als Improvisationsmethode auf Reisen dienen. Hierbei wird das aufzubereitende Wasser in handelsübliche Plastik- oder Glasflaschen abgefüllt und für mehrere Stunden zur Desinfektion in die Sonne gelegt (► Abb. 5).

Die Wirksamkeit des SODIS-Verfahrens beruht auf einer Kombination aus solarer UVA-Strahlung (315–400 nm) und thermischer Desinfektion [29]. Im Gegensatz zu UVC schädigt UVA die mikrobielle Zelle vor allem indirekt über die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies (ROS), welche oxidativen Stress auf die Zelle ausüben. Durch UVA wird also in gewisser Weise eine Form der chemischen Desinfektion induziert. Bei starker Sonneneinstrahlung wird eine Einwirkzeit von 6 Stunden empfohlen, bei bewölktem Himmel sollte die Exposition auf 48 Stunden verlängert werden [29]. Für eine ausreichende Wirksamkeit muss das Wasser absolut klar und die Flasche in gutem Zustand sein. Durch die Platzierung der Flasche auf einem reflektierenden Untergrund oder eine schwarze Bemalung der Flaschenrückseite kann zusätzlich eine Erwärmung des Wassers auf bis zu 65 °C erzielt werden. In diesem Falle überwiegt der thermische Effekt, womit auch trübes Wasser innerhalb einer Stunde desinfiziert werden kann [11].

Abhängig von Einwirkzeit und Temperatur des Wassers können prinzipiell alle relevanten Mikroorganismen durch SODIS abgetötet werden. Da es sich jedoch um ein nicht-standardisiertes Verfahren mit mehreren unkontrollierbaren Variablen handelt, kann eine sichere Desinfektion nicht garantiert werden.

Neben der improvisierten Trinkwasseraufbereitung durch SODIS existieren seit einiger Zeit auch kommerzielle Produkte, die sich die solare UVA-Strahlung zunutze machen. Der Prozess der ROS-Bildung kann durch die sogenannte Fotokatalyse mittels Titandioxid-Nanopartikeln (TiO₂)

erheblich beschleunigt werden. Zudem können auch andere organische und anorganische Verunreinigungen wie Pestizide oder Schwermetalle abgebaut werden (Fotodegradation) [30]. Ein Produktbeispiel ist SolarBag®, ein durchsichtiger Plastikbeutel, der ein TiO₂-beschichtetes Netz enthält. Hierbei genügt laut Hersteller je nach Bewölkungsgrad eine Einwirkzeit von 2–6 Stunden.

Reisemedizinische Beratung zur Trinkwasserdesinfektion

Umfragen im Gelände haben gezeigt, dass ein nicht unerheblicher Anteil der Reisenden eine Aufbereitung des Trinkwassers für verzichtbar hält [10] oder trotz besseren Wissens ein Mangel an Compliance herrscht [31]. Daher ist es sinnvoll, in einer reisemedizinischen Beratung zunächst die grundsätzliche Notwendigkeit einer eigenständigen Aufbereitung sowie die Risiken trinkwasserassoziierter Erkrankungen zu thematisieren. Anschließend sollte der Ratsuchende bei der Auswahl einer geeigneten Methode unterstützt werden. Wenn geklärt ist, welche Verfahren prinzipiell in Frage kommen, sollten Wirkmechanismus und mögliche Einflussfaktoren erläutert werden. Außerdem sollte auf die Instandhaltung des Equipments eingegangen werden. Schließlich ist eine Backupmethode festzulegen, die im Notfall verfügbar wäre, falls das primär genutzte Verfahren ausfällt.

Auswahl der geeigneten Methode

Die Auswahl der Methode richtet sich nach bereister Region, Reiseart und persönlichen Vorlieben des Reisenden. Nicht alle Methoden eignen sich gleichermaßen für alle Situationen. Anhand einiger Fragen kann die Auswahl eingegrenzt werden.

Um welche Reiseart handelt es sich, welche Wasserbezugsquellen stehen zur Verfügung und wie ist die zu erwartende Wasserqualität?

Bei Reisen mit Hotelunterkunft beziehungsweise in städtische Regionen ist davon auszugehen, dass Leitungswasser verfügbar ist. Dieses dürfte (zumeist) klar sein oder nur leichte Trübungen aufweisen. Auch ist es wahrscheinlich, dass zumindest intermittierend eine Stromversorgung gewährleistet ist und eventuell sogar Batterien käuflich erworben werden können. In diesem Szenario wäre eine Aufbereitung mittels UVC- oder Ozon-Pen denkbar. Auch chemische Verfahren wären praktikabel. In Gebieten mit starker industrieller oder landwirtschaftlicher Nutzung ist dagegen zum Beispiel ein filtrierendes Verfahren mit adsorbierenden Eigenschaften vorzuziehen, da das Vorhandensein von anorganischen Toxinen und Pestiziden angenommen werden muss. Auch können Verschiebungen des pH-Werts vorliegen, die die Wirksamkeit der chemischen Desinfektion beeinträchtigen. Handelt es sich dagegen um eine Trekkingreise in wenig oder nicht erschlossene Regionen, stehen als Wasserquellen Fließ- und Oberflä-

chengewässer oder Brunnen zur Verfügung. Wenn möglich sollte vorher geklärt werden, ob mit stärkeren Trübungen zu rechnen ist. In diesem Falle sollte eine Möglichkeit zur Vorfiltration vorhanden sein.

Welche Gepäckkapazität hat der Reisende?

Bei Trekkingreisen ist zumeist eine limitierte Gepäckkapazität zu berücksichtigen. Hier eignen sich besonders chemische Verfahren, da sowohl Tabletten als auch Tropflösungen leicht und platzsparend sind. Größere Geräte wie insbesondere Keramikfilter besitzen dagegen ein hohes Gewicht und sind damit eher weniger geeignet. Ist dennoch ein filtrierendes Verfahren gewünscht, stellen zum Beispiel die leichteren Hohlfasernfilter eine Alternative dar.

Erfolgt die Trinkwasseraufbereitung individuell oder für mehrere Personen?

Für die Aufbereitung größerer Mengen an Wasser stellt zum Beispiel das Abkochen eine Option dar. Allerdings ist die Praktikabilität des Verfahrens entscheidend von der Reiseart und der Gepäckkapazität abhängig. Für die Nutzung durch mehrere Personen eignen sich darüber hinaus Reservoirbehälter oder -beutel mit integrierter Filtereinheit, bei denen Wasser nach Bedarf abgezapft werden kann (Schwerkraftfilter, z. B. Katadyn® Base Camp Pro).

Wie ist das Klima in der Reiseregion?

In Gebieten mit hoher Luftfeuchtigkeit müssen chemische Produkte in Tablettenform mit großer Vorsicht behandelt werden, da es bei beschädigter Verpackung zu einem Wirksamkeitsverlust kommen kann. Ist dagegen mit Frost zu rechnen, sind filtrierende Verfahren möglicherweise nicht die beste Option, da Filter durch Einfrieren beschädigt werden können.

Über welchen Zeitraum ist der Reisende auf eine eigenständige Wasseraufbereitung angewiesen?

Je nachdem ob es sich um einen Kurztrip ins Gelände oder einen längeren Auslandsaufenthalt handelt, eignen sich verschiedene Methoden. Chemische Produkte haben im Vergleich zu Filtern oder anderen Geräten einen relativ niedrigen Anschaffungspreis, jedoch sind die Kosten pro aufbereitetem Liter höher. Daher eignen sie sich vor allem für Reisen von kürzerer Dauer. Bei längerfristigen Aufenthalten rechnet sich dagegen der Kauf teurerer Equipments, welches eine größere Anzahl an Litern aufbereiten kann.

Welche Vorlieben hat der Reisende selber beziehungsweise welche Faktoren sind ihm wichtig?

Die verschiedenen Vor- und Nachteile der Methoden werden individuell sehr unterschiedlich gewichtet. So empfinden einige den Geruch/Geschmack von Chlorprodukten als extrem störend, während andere diesen kaum oder gar nicht wahrnehmen, da die Geruchs-/Geschmacksschwelle für Chlor von Person zu Person sehr verschieden ist [32]. Für andere sind Gewicht und Größe von Handpumpen-

filtern oder anderen Geräten eher abschreckend. Wieder andere bevorzugen Methoden, die nicht energieabhängig sind, womit sowohl die UVC- und Ozonaufbereitung als auch die elektrolytische Desinfektion als Optionen ausscheiden. Auch der vergleichsweise hohe Zeitbedarf der chemischen Desinfektion kann eine Rolle spielen. Diese Faktoren in die Überlegungen mit einzubeziehen ist wichtig, da sich dies auf die Compliance des Reisenden im Hinblick auf eine konsequente Anwendung der Methode auswirken kann.

Fehlervermeidung

Abschließend soll kurz auf einige wichtige Fallstricke bei verschiedenen Methoden eingegangen werden.

Chemische Verfahren:

- Teilweise haben Produkte mit verschiedenen Inhaltsstoffen ähnliche Handelsnamen. Beispiele sind Micropur® classic und Micropur® forte: Während letzteres Chlor (NaDCC) enthält und somit ein Desinfektionsmittel darstellt, ist die classic-Variante ein reines Silberprodukt und ausschließlich zur Konservierung bereits aufbereiteten Wassers geeignet. Ein weiteres Beispiel sind Potable Aqua® Water Purification Tablets, welche als jod- und auch als chlordioxidbasierte Variante verfügbar sind.
- Zur Eliminierung eines chlorartigen Geruchs/Geschmacks können Neutralisierungstropfen (Natriumthiosulfat) oder Ascorbinsäure zugefügt werden. Da diese Substanzen jedoch auch die Desinfektionswirkung aufheben, darf dies erst nach einer ausreichend langen Einwirkzeit erfolgen. Gleiches gilt für die Zugabe geschmacksgebender Substanzen wie Vitaminbrausetabletten, da hierdurch der pH-Wert beeinflusst werden kann.
- Luft- und UV-Exposition des gechlorten Wassers reduzieren den Restchlorgehalt, wodurch zwar die Geschmacks-/Geruchsqualität verbessert aber auch die Desinfektionswirkung herabgesetzt wird. Dies ist insbesondere bei Chlordioxid von Relevanz, bei dessen Anwendung die Wasserflasche sogar während der Einwirkzeit verschlossen und dunkel gelagert werden sollte.
- Bei Tabletten, die nicht einzeln in Blistern verpackt sind sondern in Plastikdosen gelagert werden, ist ein gradueller Wirksamkeitsverlust durch Luftkontakt oder das Eindringen von Feuchtigkeit möglich. Solche Behälter sollten stets gut verschlossen sein und so selten wie möglich geöffnet werden. Das Haltbarkeitsdatum ist streng zu beachten.
- Bei kaltem Wasser und zur sicheren Abtötung von Protozoen muss die Einwirkzeit verlängert oder eine höhere Halogendosis hinzugegeben werden (Achtung: gegen Kryptosporidien ist nur Chlordioxid wirksam).

Physikalische Verfahren:

- Es besteht keine konservierende Wirkung. Eine Rekontamination durch Rückstände verunreinigen

Wassers im Flaschenhals/Deckel oder neuen Eintrag von erregerhaltigem Schmutz ist möglich. Daher sollte auf diese Weise aufbereitetes Wasser nicht über längere Zeit gelagert werden.

- Wasserfilter unterscheiden sich in einigen Merkmalen grundlegend voneinander (Porengröße/Material). Nicht alle sind gegen Viren oder anorganische Toxine wirksam, weshalb die jeweiligen Produktspezifikationen zu beachten sind.
- Bei der UVC-Desinfektion mittels SteriPEN® ist eine suffiziente Wasserbewegung während der Bestrahlung essenziell. Rührbewegungen mit dem Gerät in einem engen Flaschenhals sind nicht ausreichend. Bei Enghalsflaschen sind daher nur solche Modelle geeignet, die mit einem abdichtenden Gummipfropfen ausgestattet sind, der ein Schwenken oder Schütteln der Flasche während der Bestrahlung ermöglicht.

Schließlich sollte in einer Beratung kurz auf den Kauf von Trinkwasser eingegangen werden. In vielen Regionen kann industriell abgefülltes Mineralwasser in versiegelten Einwegflaschen erworben werden. Dies stellt eine praktische Option für Reisende und eine gute Einnahmequelle für die Einheimischen dar. Jedoch werden hierdurch beträchtliche Mengen an Plastikmüll generiert. Wichtig zu wissen ist auch, dass dieses Wasser nicht immer über jeden Zweifel erhaben ist. In vielen Ländern unterliegen Abfüllung und Verkauf von Trinkwasser keinerlei Qualitätsstandards beziehungsweise Kontrollen. Tatsächlich konnten in Studien teilweise mikrobielle, gelegentlich sogar fäkale Verunreinigungen nachgewiesen werden [33]. Auch ist eine illegale Wiederbefüllung bereits benutzter Flaschen in Einzelfällen nicht auszuschließen. Dennoch stellt abgepacktes Wasser im Vergleich zu unbehandeltem Leitungswasser die erheblich sicherere Option dar.

Fazit und Ausblick

Vor dem Hintergrund der vielfältigen Produkte auf dem heutigen Markt sind pauschale Aussagen zur Wirksamkeit der klassischen Kategorien wie chemische Desinfektion oder Filtration nicht mehr möglich. Chlor ist nicht gleich Chlor und Filter nicht gleich Filter. Aufgrund der immer diverseren Produktgestaltungen, die teilweise nur in kleinen aber entscheidenden Details voneinander abweichen, sind für jedes Produkt die Spezifikationen zu beachten. Die zahlreichen Innovationen bieten interessante neue Perspektiven für die Trinkwasserdesinfektion auf Reisen. Jedoch ist eine Beratung Reisender aufgrund der unzureichenden Datenlage oft schwierig und nur auf Basis von Herstellerangaben möglich. Hier wäre die Durchführung unabhängiger Studien wünschenswert. Dennoch kann eine praxisorientierte Beratung zur richtigen Auswahl der Methode sowie die Vermittlung von Grundkenntnissen zu Wirkmechanismen und Einflussfaktoren die Kompetenz der Reisenden erhöhen und die Compliance stärken.

Interessenkonflikt

Die Autorin gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht. Die genannten Marken und Produkte dienen lediglich zur Herstellung eines Praxisbezugs und wurden als Beispiele ausgewählt, da sie unter Reisenden im Gelände zur Anwendung kommen.

Literatur

- [1] Steffen R. Epidemiology of traveler's diarrhea. *Clin Infect Dis* 2005; 41 Suppl 8: S536–S540
- [2] Guillot E, Loret J-F. *Waterborne Pathogens: Review for the Drinking Water Industry*. London: IWA Publishing; 2009
- [3] Diemert DJ. Prevention and self-treatment of traveler's diarrhea. *Clin Microbiol Rev* 2006; 19: 583–594
- [4] Shah N, DuPont HL, Ramsey DJ. Global etiology of travelers' diarrhea: systematic review from 1973 to the present. *Am J Trop Med Hyg* 2009; 80: 609–614
- [5] World Health Organization. *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4th Ed. Genf: WHO Press; 2011
- [6] Biswas G, Sankara DP, Agua-Agum J et al. Dracunculiasis (guinea worm disease): eradication without a drug or a vaccine. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2013; 368: 20120146
- [7] Kaya M, Beştaş R, Çetin S. Clinical presentation and management of Fasciola hepatica infection: single-center experience. *World J Gastroenterol* 2011; 17: 4899–4904
- [8] Flörchinger B. Trinkwasserdesinfektion auf Reisen. *Flug u Reisemed* 2010; 17: 125–128
- [9] Küpper T, Schoeffl V, Milledge J. Consensus Statement of the UIAA Medical Commission Vol. 6: Water Disinfection in the Mountains. 2012. Im Internet: www.theuiaa.org/medical_advice.html
- [10] Timmermann L. Trinkwasserdesinfektion auf Reisen – Verfahren, Umsetzung durch Reisende im Gelände und Analyse der mobilen UVC-Desinfektion. In: Kraus T, Küpper T (Hrsg.). *Aachener Schriftenreihe zur Präventivmedizin*. Düren: Shaker; 2019
- [11] Backer HD. Field Water Disinfection. In: Auerbach PS, Cushing TA, Harris NS (Ed.). *Auerbach's Wilderness Medicine*. 7th Ed. Philadelphia, PA: Elsevier; 2017: 1985–2030
- [12] World Health Organization. Iodine as a drinking-water disinfectant. 2018. Im Internet: www.who.int/water_sanitation_health/publications/iodine-02032018.pdf
- [13] Baribeau H, Prévost M, Desjardins R et al. Chlorite and Chlorate ion variability in distribution systems. *Journal – American Water Works Association* 2002; 94: 96–105
- [14] Roeske W. *Trinkwasserdesinfektion*. 3. Aufl. München: Deutscher Industrieverlag; 2016
- [15] American Water Works Association. *Manual of Water Supply Practices M20: Water Chlorination / Chloramination Practices and Principles*. 2nd Ed. Denver, CO: AWWA; 2006
- [16] Warf CC Jr. Chlorine Dioxide and the Small Drinking Water System. In: Cotruvo JA, Craun GF, Hearne N (Ed.). *Providing Safe Drinking Water in Small Systems: Technology, Operations, and Economics*. Boca-Raton, FL: Lewis; 1999: 121–131
- [17] Clarkon RM, Moule AJ, Podlich HM. The Shelf-Life of Sodium Hypochlorite Irrigating Solutions. *Australian Dental Journal* 2001; 46: 269–276
- [18] Wisconsin Pharmacal Company. *Potable Aqua PURE™ Instruction Manual*. 2015. Im Internet: www.potableaqua.com/wp-content/uploads/2015/04/InstructionManual.pdf
- [19] Roving Blue. *Roving Blue® O-Pen™ Operations Manual*. 2016. Im Internet: www.rovingblue.com/system/o-pen/documents/roving-blue-o-pen-manual.pdf
- [20] Kędziora A, Speruda M, Krzyżewska E et al. Similarities and Differences between Silver Ions and Silver in Nanoforms as Antibacterial Agents. *Int J Mol Sci* 2018; 19: pii: E444
- [21] Küpper T. Prävention enteral übertragener Erkrankungen. In Rieke B, Küpper T, Muth C-M (Hrsg.). *Moderne Reisemedizin*. Stuttgart: Gentner; 2013: 246–254
- [22] Hof H, Dörries R. *Medizinische Mikrobiologie*. 5. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2014
- [23] World Health Organization. *Boil Water*. 2015. Im Internet: www.who.int/water_sanitation_health/dwq/Boiling_water_01_15.pdf
- [24] Pandey N, Shukla SK, Singh NB. Water purification by polymer nanocomposites: an overview. *Journal Nanocomposites* 2017; 3: 47–66
- [25] Timmermann LF, Ritter K, Hillebrandt D et al. Drinking water treatment with ultraviolet light for travelers – Evaluation of a mobile lightweight system. *Travel Med Infect Dis* 2015; 13: 466–474
- [26] Bolton JR, Cotton CA. *The Ultraviolet Disinfection Handbook*. Denver, CO: American Water Works Association; 2008
- [27] United States Environmental Protection Agency. *Ultraviolet Disinfection Guidance Manual*. Washington D.C.: EPA; 2006
- [28] Chevrefils G, Caron É, Wright H et al. UV Dose Required to Achieve Incremental Log Inactivation of Bacteria, Protozoa and Viruses. *IUVA News* 2006; 8: 38–45
- [29] McGuigan KG, Conroy RM, Mosler HJ et al. Solar water disinfection (SODIS): a review from bench-top to roof-top. *J Hazard Mater* 2012; 235-236: 29–46
- [30] Jiang L, Wang Y, Feng C. Application of Photocatalytic Technology in Environmental Safety. *Procedia Eng* 2012; 45: 993–997
- [31] Lechner K. *Risiko-Management im Trekking – Ergebnisse der ADEMED-Expedition 2008*. Dissertation an der Medizinischen Fakultät der RWTH Aachen; 2013
- [32] Piriou P, Devesa R, Puget S et al. Evidence of regional differences in chlorine perception by consumers: sensitivity differences or habituation? *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA* 2015; 64: 783–792
- [33] Williams AR, Bain RE, Fisher MB et al. A Systematic Review and Meta-Analysis of Fecal Contamination and Inadequate Treatment of Packaged Water. *PLoS One* 2015; 10: e0140899