

„Vorkommen von Mikroplastik im Oberlauf der Fulda und daraus resultierende mögliche Folgen für die Biodiversität“

Bachelorarbeit im Studiengang B. Sc. „Biologische Diversität und Ökologie“

vorgelegt von

Matthias Mau, Matrikel-Nummer: 21547984
geb. in Karlsruhe, 26.03.1991

angefertigt am Institut für

Johann-Friedrich-Blumenbach Institut für Zoologie und Anthropologie
an der Fakultät für Biologie und Psychologie
der Georg-August-Universität zu Göttingen

Abgabe im SoSe 2020

Erstbetreuer:

Prof. Dr. Matthias Waltert

Zweitbetreuer:

Dr. Eckhard Gottschalk

Tag der Abgabe der Bachelorarbeit:

06.07.2020

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1 - Nutzung der Kunststoffe.....	1
1.2 - Produktion & Recycling.....	2
1.3 - Plastikeintrag in die Umwelt.....	3
1.4 - Ökologische & Gesundheitliche Folgen.....	4
1.5 - Zielsetzung dieser Arbeit.....	5
2. Material & Methoden.....	6
2.1 – Untersuchungsgebiet.....	6
2.2 – Probenentnahme.....	7
2.3 – Analytik (Überblick).....	8
2.4 – Wessling GmbH.....	9
2.5 – Analytik (Methodenvergleich).....	11
2.6 – Statistik.....	12
3. Ergebnisse.....	12
3.1 – Nachweis von Mikroplastik.....	13
3.1.1 – Fuldaquelle (19-212075-01).....	13
3.1.2 – Landwirtschaft 1 (19-212075-02).....	13
3.1.3 – Landwirtschaft 2 (19-212075-03).....	14
3.1.4 – Baustoffgesellschaft 1 (19-212075-04).....	14
3.1.5 – Baustoffgesellschaft 2 (19-212075-05).....	14
3.1.6 – A7 (19-212075-06).....	14
3.1.7 – A66 (19-212075-07).....	15
3.1.8 – Wertstoffhof 1 (19-212075-08).....	15
3.1.9 – Wertstoffhof 2 (19-212075-09).....	15
3.1.10 – Kläranlage 1 (19-212075-10).....	15
3.1.11 – Kläranlage 2 (19-212075-11).....	15
3.2 – Übersicht.....	16
3.3 – Methodenvergleich.....	16
3.4 – statistische Analyse.....	17
4. Diskussion.....	19
4.1 – Fehlerdiskussion.....	19
4.2 – nachgewiesene Kunststoffe.....	20
4.2.1 – Polyethylenterephthalat (PET), n = 758; 38,65 % der Gesamtmenge.....	21
4.2.2 – Polystyrol (PS), n = 661; 33,70 % der Gesamtmenge.....	21
4.2.3 – Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS), n = 254; 12,95 % der Gesamtmenge.....	21
4.2.4 – Polypropylen (PP), n = 170; 8,66 % der Gesamtmenge.....	21
4.2.5 – Polyethylen (PE), n = 118; 6,01 % der Gesamtmenge.....	21
4.3 – ökologische Folgen.....	22
4.4 – gesundheitliche Gefahren.....	24
4.5 – Lösungsansätze.....	24
5. Zusammenfassung.....	25
6. Literaturverzeichnis.....	27
7. Anhang.....	30

1. Einleitung

In unserer heutigen Gesellschaft sind Kunststoffe, ugs. auch Plastik genannt, als Werkstoffe unersetzlich geworden um Verpackungen und unzählige andere Produkte herzustellen. Dabei findet sich Plastik nicht nur in der Wirtschaft, in der medizinischen Technologie oder in Privathaushalten, sondern leider auch als Abfall ubiquitär in der Umwelt verteilt (Bertling, Bertling, Hamann 2018). Größtenteils sind es halb- oder vollsynthetische makromolekulare Werkstoffe, welche durch physikalische, biologische oder chemische Prozesse nach und nach in Mikroplastik-Partikel zerfallen (siehe 1.3). Neben den bekannten negativen Auswirkungen von Makroplastik auf Individuen sind die, aus dem Eintrag von Mikroplastik resultierenden ökologischen Folgen für die Biodiversität bisher kaum abzusehen, ebenso wenig wie die möglichen gesundheitlichen Gefahren für den Menschen.

1.1 - Nutzung der Kunststoffe

Pflanzliche und tierische Zellen enthalten Polymere, sog. Biopolymere wie beispielsweise Cellulose, die durch anthropogene Bearbeitung zu Kunststoffen umgeformt werden können und, je nach Werkstoff, unterschiedliche nützliche Eigenschaften aufweisen. Die erste nachgewiesene Verwendung von natürlich vorkommendem, plastikähnlichem Gummi datiert bis auf das 16. Jahrhundert v. Chr. zurück, wobei das Rohmaterial in Mesoamerika aus dem Panama-Kautschukbaum *Castilla elastica* (Cerv.) gewonnen wurde (Hosler, Burkett & Tarkanian 1999). In der folgenden Zeit wurde der steigende Bedarf an plastischem Kautschuk vor allem über den intensiven Plantagenanbau von *Hevea brasiliensis* ((Willd. ex. A.Juss.) Müll.Arg.) gedeckt, welcher aktuell vermehrt zu Monokulturen in zahlreichen Staaten Süd-Ost-Asiens führt und tropische Primärwälder sowie deren Artenvielfalt verdrängt (Warren-Thomas et al. 2018). Diese wirtschaftliche Entwicklung mit desaströsen ökologischen Folgen hängt mit der industriellen Nutzung des Prozesses der Schwefelvulkanisation zusammen, der 1839 vom Erfinder Charles Goodyear entdeckt wurde und in dem thermoplastischer Naturkautschuk zu elastomerem Gummi verarbeitet wird. Bis heute bildet dieser Vorgang die Grundlage zur Herstellung von Reifen und anderen elastischen Gummi-Produkten auf Basis von natürlich vorkommenden Polymeren (Biederbick 1977). Neben dieser Gruppe von Kunststoffen gab es keine anderen industriell hergestellten synthetischen Polymere, bis zur Entwicklung des Stoffes Bakelit durch den Chemiker Leo Hendrik Baekeland im Jahre 1905 (Thompson et al. 2009). Dieser Schritt ermöglichte industrielle Massenfertigungen und förderte den erhöhten militärischen Bedarf an neuartigen Werkstoffen während des zweiten

Weltkriegs. Diese Entwicklung resultierte so in einer stetig wachsenden Massenproduktion verschiedenster vollsynthetischer Kunststoffe bis in die Gegenwart hinein (Fath 2019).

1.2 - Produktion & Recycling

Synthetisch hergestelltes Plastik wird zumeist in der mechanisch-thermischen Einteilungsweise in die drei Großgruppen Duroplaste, Thermoplaste und Elastomere aufgeteilt. Dabei werden die Stoffe durch ihre Eigenschaften definiert, wobei das Verhalten unter mechanischer und thermischer Einwirkung eine entscheidende Rolle spielt. Des Weiteren werden Kunststoffe entweder über die Verwendung, über den Ursprung (natürlich/synthetisch) oder über das Herstellungsverfahren, bzw. über die jeweilige Entstehungsreaktion klassifiziert (Elias 2003). Um ähnliche Eigenschaften natürlich vorkommender Polymere im Endprodukt zu erzielen, werden in der Herstellung von synthetischen Kunststoffen die Verfahren der Kettenpolymerisation und der Stufenpolymerisation genutzt, um Monomere zu Polymeren zusammenzufügen. Aktuell werden über 20 verschiedene Gruppen von synthetischen Kunststoffen hergestellt, von denen sechs Sorten (PE (29,8%), PP (19,3%), PVC (10%), PU/PUR (7,5 %), PET (7,4%) & PS (6,7%)) mittlerweile über 90% der globalen Jahresproduktion ausmachen (Heß et al. 2019). Dabei ist die jährliche Produktion von Kunststoffen seit 1950 stark angewachsen, von ca. 1.000.000t auf über 380.000.000t in 2017 (Fath 2019). Von der Gesamtheit der jemals produzierten Menge an Plastikprodukten (8,3 Mrd. t; bis 2017) wurden Schätzungen zufolge lediglich 9% dem Recycling zugeführt und 12% thermisch verwertet (Geyer, Jambeck, Law 2017). Laut der Eurostat-Pressestelle gilt Deutschland seit Langem mit einer Recycling-Rate von 45% und einer thermischen Verwertung von 55% (in 2010) im internationalen Vergleich als Vorbild (statistische Abfrage vom 12.05.2020, Eurostat 2012).

Bis Ende 2017 importierte zudem die Volksrepublik China einen Großteil des global anfallenden Plastikmülls um diesen stofflich zu verwerten (7.300.000t in 2016), zog sich aus dieser selbst auferlegten Verpflichtung jedoch zum Jahreswechsel 2017/2018 zurück. Durch diese Entwicklung sind verschiedene Staaten künftig dringend dazu angehalten, Abfall-Kreislaufsysteme zu etablieren um weitere Umweltverschmutzungen zu vermeiden, wobei dies in Entwicklungs- und Schwellenländern schwer umzusetzen sein dürfte (siehe 4.5). Dabei ist außerdem zu erwähnen, dass die Eignung eines Kunststoffes zum Recycling, als auch die eventuell bereits bestehende länderspezifische Infrastruktur der Abfallwirtschaft (beispielsweise Pfand-Systeme oder Mülltrennung) entscheidende Faktoren sind, die zum Gelingen solcher Konzepte beitragen.

1.3 - Plastikeintrag in die Umwelt

Jedes Jahr geraten schätzungsweise 9.000.000t Kunststoffe rund um den Globus ungewollt in die Umwelt und letztendlich in den Weltmeeren, wohin der Großteil des Plastiks über Fließgewässer transportiert wird (Fath 2019). Dies passiert in Siedlungsgebieten mit den größeren Plastikteilen beispielsweise durch Verwehungen von Müll aus Papierkörben, durch achtloses Wegwerfen von Verpackungen aus Einweg-Kunststoffen und im Bereich des Mikroplastik durch im Abwasser enthaltene Additive aus Kosmetikprodukten. In ruralen Gegenden hingegen entfällt ein Großteil des Plastikeintrags auf landwirtschaftliche Prozesse und zudem auf den Abrieb von Autoreifen, welcher bei Weitem den größten Teil (56% der jährlichen Mikroplastikemissionen in Dänemark) an Mikroplastik-Partikeln in der Umwelt darstellt (Lassen et al. 2015). Darüber hinaus gibt es zahlreiche verschiedene Ursachen von diffusen Plastikeinträgen, von denen längst nicht alle Prozesse verstanden worden sind. Um diese Einträge messen zu können, müssen die Plastikobjekte zunächst in verschiedene Größen klassifiziert werden. Leider gibt es bis heute weder eine standardisierte Größeneinteilung noch einheitliche Analytik rund um die Thematik Mikroplastik, wobei sich diese Arbeit im weiteren Verlauf auf eine kombinierte Einordnung von Mikroplastik bezieht (siehe Tabelle 1), auf die sich momentan auch das Umweltbundesamt stützt (www.umweltbundesamt.de 2019).

Tabelle 1: Größendefinition Plastik (nach Andrady 2011; Cole et al. 2011; Ryan et al. 2009).

Partikelgröße (µm)	Bezeichnung
> 25.000	Makroplastik
5.000 – 25.000	Mesoplastik
1.000 – 5.000	Mikroplastik (groß)
< 1.000	Mikroplastik (klein)

Darüber hinaus wird Mikroplastik je nach Herkunft unterschieden. Als primäres Mikroplastik gelten beispielsweise sog. „Microbeads“, die für den industriellen Gebrauch hergestellt und als Spülhilfe verschiedenen Körperpflegeprodukten wie etwa Duschgel, Zahnpasta oder Make-Up zugegeben werden (Liebezeit und Dubaish 2012). Primäres Mikroplastik wird vorwiegend über Siedlungs-Abwässer in aquatische Systeme eingebracht und kann bisher nur bedingt durch Kläranlagen zurück gehalten werden (Fath 2019).

Sekundäres Mikroplastik bezeichnet all jene Partikel, die durch UV-Einstrahlung, durch biologisch-chemische Prozesse oder durch mechanischen Abrieb von größeren Plastikteilen erodiert werden. Dieses sekundäre Mikroplastik macht den weitaus größeren Eintrag an Partikeln aus, wobei die genauen Anteile schwer zu messen sind. Dieser Umstand begründet sich damit, dass die oben genannten Einträge von 9.000.000t im Jahr die Gesamtheit an Plastik (Makro-, Meso- und Mikroplastik) beinhalten und von der geschätzten Menge nur 1%

(90.000t) im Oberflächenwasser der Meere wiederzufinden ist (Kane et al. 2020). Wohin sind demnach die restlichen 99% verschwunden? Die Antwort auf diese Frage kann nur sein, dass der Großteil des Abfalls entweder auf den Grund der Ozeane abgesunken ist (mit Wasser gefüllte PET-Flaschen haben beispielsweise ein höheres spezifisches Gewicht als Wasser selbst), oder die Kunststoffe liegen in Form von Mikroplastik vor. Die Hinweise darauf verdichten sich in den letzten Jahren und es können immer wieder Wissenslücken anhand von wissenschaftlichen Studien gefüllt werden. So zeigt eine aktuelle Arbeit beispielsweise, dass aufgrund der Akkumulation von Sedimenten an bestimmten Hotspots in der Tiefsee 1m² Meeresgrund von bis zu 1.900.000 Partikeln bedeckt ist (Kane et al. 2020).

Je nach Autor werden zudem in der Literatur die vielfach vorkommenden Mikrofasern (siehe Abb. 1), die sich beim Waschvorgang von synthetischer Kleidung ablösen, entweder zu primärem oder zu sekundärem Mikroplastik gezählt.

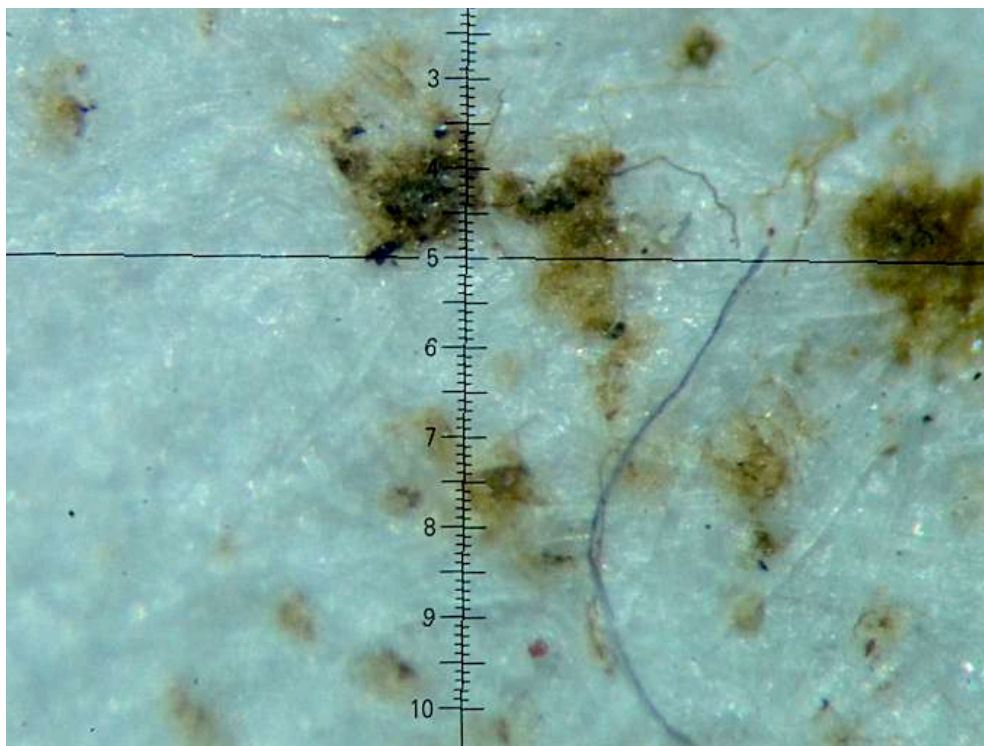


Abb.1: Mikrofaser (ca. 390 µm); Probe-Nr. 19-212075-05.2; ZEISS Stemi 508, 6,5-fache Vergrößerung.

1.4 - Ökologische & Gesundheitliche Folgen

Plastik verbraucht in der Produktion vor Allem Erdöl, Wasser und emittiert klimaschädliche Treibhausgase (Geyer, Jambeck, Law 2017) und ist somit bereits bevor es in die Umwelt gelangt, oder thermisch verwertet wird, umweltschädlich. In Deutschland werden immerhin 55% des anfallenden Abfalls verbrannt, was jedoch zur Freisetzung von giftigen Dioxinen, Furanen, Formaldehyden, Benzolen und vielen anderen Stoffen führt. Um diese schädlichen

Stoffe aus der Abluft der Müllverbrennungsanlagen zurückzuhalten werden Filter eingesetzt, die, sobald sie sich zusetzen, sehr stark gesundheitsschädlich und kontaminiert sind. Dieses gefährliche Endprodukt muss sicher entsorgt werden, wozu unterirdische Stollen als Endlager genutzt werden, ähnlich wie bei der Lagerung von radioaktivem Müll (Fath 2019). Werden die Abfälle stattdessen deponiert, so wie es in den meisten Staaten der Welt gehandhabt wird, gelangen Kunststoffe unweigerlich auf diffusen Wegen in die aquatische Umwelt und werden der in 1.3 beschriebenen Zersetzung ausgesetzt. Nicht erodierte Plastikteile bergen die Gefahr, dass beispielsweise verloren gegangene Fischernetze als sog. „Geisternetze“ durch die Wassersäule treiben und Tiere darin zugrunde gehen, oder dass Makro- und Mesoplastik von Wasserorganismen mit Nahrung verwechselt wird, den Verdauungstrakt blockiert und die Individuen verhungern lässt. Zudem können sich kleinere, erodierte Partikel in den Mägen der Wasserfauna anreichern und den Tieren ein Völlegefühl vermitteln, was den gleichen Effekt herbeiführt. Kunststoffe enthalten außerdem gesundheits- und umweltschädliche Additive (Flammschutzmittel, Weichmacher, etc.), die sich bei Aufnahme im Fettgewebe des Magen-Darm-Traktes anreichern können und den Organismus vergiften. Zusätzlich fungieren Mikroplastik-Partikel als Vehikel für multiresistente Keime, Umweltgifte und Schwermetalle und es besteht die Gefahr, dass der Mensch als Endverbraucher ebenfalls kontaminiert wird, wenn sich Plastik in der Nahrungskette anreichert (Fath 2019). Die weiteren möglichen ökologischen Folgen für die Biodiversität durch Mikroplastikbelastung in Gewässern werden unter 4.3 eingehender diskutiert.

1.5 - Zielsetzung dieser Arbeit

Bereits vor dem Studium bin ich durch meine Ausbildung zum Binnenschiffer mit Plastikmüll in Fließgewässern direkt in Berührung gekommen. Meine tägliche Arbeit auf dem Oberrhein bei Karlsruhe sensibilisierte mich in diesem Bereich und mir war es ein Anliegen, mich in Zukunft mit dem Thema Plastik in der Umwelt auseinanderzusetzen. Als ich dann im SoSe 19 im Rahmen einer Exkursion in das UNESCO-Biosphärenreservat Rhön Kontakt zu Jonas Thielen (M. Sc.; Sachgebietsleiter Naturschutz) aufnahm, zeigte sich im Gespräch, dass es der Leitung des Projektes ein Anliegen ist, das Vorkommen von Mikroplastik im Oberlauf der Fulda zu untersuchen. Hier besteht dringender Handlungsbedarf, da bisher nur wenig über Einträge von Mikroplastik in Fließgewässer dieser Art bekannt ist und weil die Europäische Union (EU) anhand der „Europäischen Wasserrahmenrichtlinie“ (WRRL, in Kraft getreten am 16.01.2007)) deutliche Ziele formuliert hat, um die Gewässergüte nach Möglichkeit in einen guten ökologischen Zustand zu versetzen.

Somit habe ich in ehrenamtlicher Arbeit für das Biosphärenreservat Rhön die Fulda beprobt und folgende Zielsetzung für diese Bachelorarbeit festgelegt:

1. Nachweis von: Mikroplastik-Partikel in der Quelle sowie im Oberlauf der Fulda
2. Prüfung der These: „Mit zunehmender Entfernung zur Quelle der Fulda nimmt der Anteil an Mikroplastik im Oberflächenwasser zu.“
3. Evaluation der ökologischen Folgen für die Biodiversität in Fließgewässern (Review).

2. Material & Methoden

Um dem Leser einen verständlichen Einstieg in die Thematik zu bieten, sind neben den wissenschaftlichen Hintergründen zu Probenentnahme und Analyse weitere Informationen aufgeführt, um bestimmte Entscheidungen bezüglich der Datengenerierung zu begründen. In 2.1 wird das Untersuchungsgebiet und der ökologische Kontext vorgestellt, um dann die in 2.2 aufgeführte Probenentnahme in ehrenamtlicher Arbeit eingehend zu beschreiben. Ein Überblick über die bisher angewandte Analytik findet sich unter 2.3, wobei die von der Wessling GmbH ausgeführten Tätigkeiten in Bezug zu dieser Arbeit unter 2.3.1 beschrieben sind. 2.3.2 befasst sich mit einer vom Autor durchgeführten Analyse mit der Zielsetzung, die Methodik auf Eignung zum Nachweis von Mikroplastik zu prüfen.

Die hier beschriebene, vorangegangene ehrenamtliche Arbeit dient als Grundlage der Datenauswertung im Rahmen der Bachelorarbeit.

2.1 – Untersuchungsgebiet

Die Rhön ist ein etwa 3.300km² großes Mittelgebirge und liegt in den drei Bundesländern Bayern, Thüringen und Hessen. Die Erhebung verfügt über eine überdurchschnittliche hohe Dichte an Süßwasser-Quellen, von denen die Fuldaquelle nur eine von vielen ist (Zaenker, Reiss 2008). Die 220,4km lange Fulda entspringt auf der Wasserkuppe in der Rhön auf 850m ü. NN (50° 29' 31" N, 9° 57' 12" O), unweit der Verwaltungsstelle des UNESCO-Biosphärenreservates und ist dort in einem künstlichen Bassin gefasst, welches die vielen kleinen (ca. 100) Quellgewässer zusammenführt. Die ersten 40 km bis zur gleichnamigen Stadt Fulda (275 m ü. NN) sind als Oberlauf des Flusses definiert. Dabei durchfließt der linke Quellfluss der Weser bis zum Zusammenfluss in Hannoversch Münden ausschließlich hessisches Gebiet und überwindet auf den ersten 6 km als schnell fließender Bach bereits 368m Höhenunterschied. Die Gewässergüte im ersten Abschnitt (Oberlauf) wird im Rahmen der WRRL als ökologisch gut bis sehr gut bewertet (Hessisches Landesamt für Umwelt und

Geologie 2009). Nach Aussage des zertifizierten Natur- und Landschaftsführers Stefan Zaenker (Email, 21.11.2019) sind in Bezug auf Mikroplastik bislang keine wissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt worden, obwohl ein entsprechendes Projekt der Phillips-Universität Marburg dafür vorgesehen war.

Um die Entnahmestellen für die Proben festzulegen, wurde zunächst eine Luftbildkartierung anhand des Geoportals Hessen (GDI Hessen, Zugriff am 23.11.2019) durchgeführt (siehe Abb. 2) und mögliche Emittenten von Mikroplastik-Partikeln entlang der Ufer des Baches ermittelt. Neben einer Kontroll-Probe aus der Quelle der Fulda wurden zehn weitere Entnahmestellen definiert. Dabei ist darauf geachtet worden, stets vor und nach dem Standort eines möglichen Verursacher zu beproben, um mögliche Effekte anhand von Unterschieden in der Anzahl von Partikeln sowie im detektierten Material feststellen zu können.

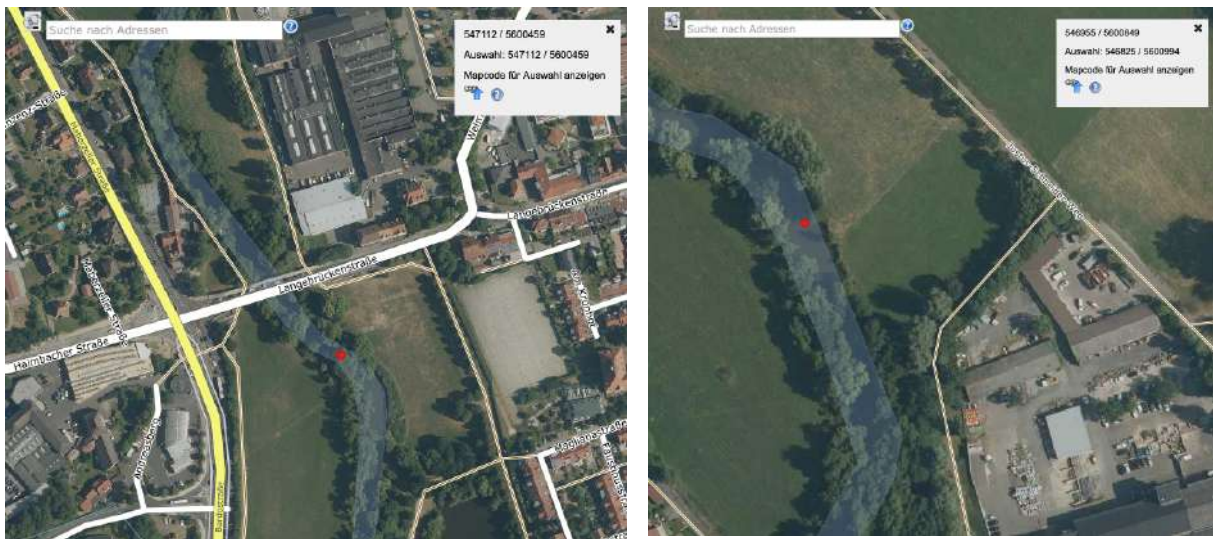


Abb. 2: Probe-Entnahmestellen 19-212075-08 & 19-212075-09, dargestellt als rote Punkte. Die Beprobung erfolgte jeweils vor und nach vermuteten Mikroplastik-Emittenten (in diesem Fall: Wertstoffhof Fulda).

2.2 – Probenentnahme

Nach der Luftbildkartierung (2.1) wurde zudem durch eine Begehung festgestellt, ob sich die einzelnen Entnahmestellen tatsächlich für eine Beprobung eignen. Mit Hinblick auf die Art der Proben (siehe 2.3) wurde dabei die Zugänglichkeit sowie die Lage der jeweiligen Entnahmestelle im Flussquerschnitt berücksichtigt, wobei auf ähnliche Bedingungen (Tiefe, Fließgeschwindigkeit, gleiche Abstände zu beiden Ufern) zu achten war.

Am 12.12.2019 erfolgte die Beprobung der Fulda in Zusammenarbeit mit der damaligen studentischen Praktikantin der Verwaltungsstelle des Biosphärenreservates Carolin Müller.

Dabei wurden zylindrische Glasgefäße mit einem Nennvolumen von 1.062ml und ohne jegliche Anteile an Kunststoffen im Deckel verwendet um eine eventuelle Kontamination der

Proben zu vermeiden (Abb. 3). Die Entnahme der einzelnen Bulk-Water-Proben erfolgte in den oberen 10cm der Wassersäule, da sich in diesem Bereich aufgrund der geringeren Dichte zu Wasser bis zu 90% der unter der Oberfläche treibenden Mikroplastik-Partikel befinden (Li, Liu, Chen 2017). An jedem Standort wurden vier Probengefäße befüllt, von denen je zwei Exemplare eingelagert wurden (Abb. 4). Je eine Probe wurde an das analytische Unternehmen Wessling GmbH mit Sitz in Altenberge versandt und je eine nach Göttingen überstellt, um weitere Untersuchungen an der Universität durchzuführen (siehe 2.4).

Die Auswahl des Labors erfolgte nach den üblichen Auswahlkriterien der Vergabeverordnung des UNESCO-Biosphärenreservates Rhön. Zudem war es entscheidend, ob die verlangte Dienstleistung bis Ende Februar 2020 vom analytischen Unternehmen zu erbringen war.

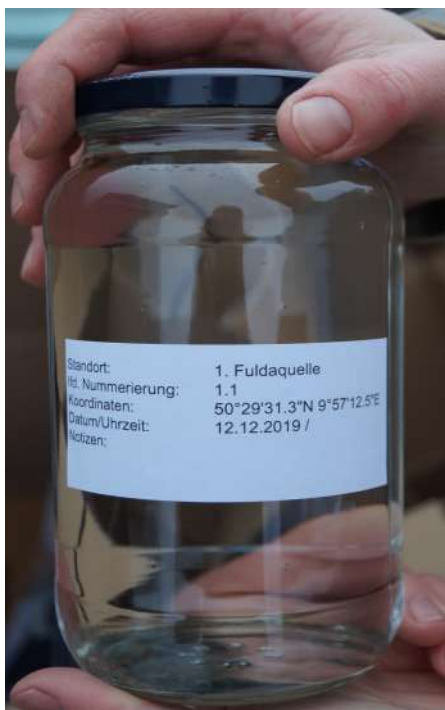


Abb. 3: volles Probengefäß mit Etikettierung.



Abb. 4: Probenentnahme direkt aus der Fuldaquelle.

2.3 – Analytik (Überblick)

Wie bereits unter 1.3 beschrieben, existiert bis heute kein harmonisiertes oder standardisiertes Verfahren in Bezug auf Proben-Entnahme und Analytik, wobei zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen zum Thema Mikroplastik vorliegen. Gegenstand der Abschlusskonferenz des BMBF-Vorhabens „Mikroplastik im Wasserkreislauf“ (MiWa) am 10.09.2019 war ebendieser Umstand, sowie die Vorstellungen verschiedener Methoden rund um Probendesign, Proben-Entnahme, Analytik und mögliche gesundheitliche Gefährdungen für den Menschen. Dabei wurde dem Autor dieser Arbeit aufgezeigt, welche technischen Möglichkeiten existieren und welche Sinnhaftigkeit diesen in Bezug auf repräsentative Datenerhebung zugeschrieben wird.

Die bisher angewandten Methoden um Mikroplastik in Gewässern nachzuweisen gestalteten sich in den meisten Fällen je nach der Art der jeweiligen Fragestellung. In vielen Fällen (offene Wasserfläche, breite Flussquerschnitte) eignen sich Netze mit bestimmten Maschenweiten (sog. „Manta-Trawls“), die entweder vom Schiff oder direkt vom Ufer durch das Oberflächenwasser gezogen werden. Zu dieser Art der Beprobung gehört der zusätzliche Einsatz eines sog. Flowmeter, um die Durchflussmenge während der Messung zu ermitteln (Barrows 2017). Eine andere bewährte Methode ist das Sieben von Sediment-Proben, da ein Großteil der Mikroplastik-Partikel absinkt und sedimentiert wird (Bertling, Bertling, Hamann 2018). Eine dritte Möglichkeit der Beprobung stellt das sog. Bulk-Water-Sampling dar, welche zur Bestimmung kleinster Partikel gut geeignet ist (Hidalgo-Ruz et al. 2012).

Nach der Proben-Entnahme werden die Proben im Labor analysiert, wobei die Aufbereitung der Probe durch die Auswahl des Detektionsverfahren definiert wird. Hier haben sich drei verschiedene Analyse-Verfahren (FTIR-Spektroskopie, Raman-Spektroskopie & Pyrolyse-GC) etabliert, deren Eigenschaften in Tabelle 2 aufgelistet sind.

Tabelle 2: Übersicht verschiedener analytischer Detektionsverfahren für Mikroplastik und Ergebnisgenerierung.

Verfahren	Polymersorte	Partikelanzahl	Partikelgröße	Masse
FTIR (spektroskopisch)	Ja	Ja	>20 µm	Nein
Raman (spektroskopisch)	Ja	Ja	>1µm	Nein
Pyrolyse-GC (thermoanalytisch)	Ja	Nein	Nein	Ja

2.4 – Wessling GmbH

Bei einem schnell fließenden Mittelgebirgsbach wie der Fulda eignen sich die oben genannten Methoden jedoch nur bedingt, weshalb sich das Probendesign nach dem Vorbild ähnlicher, vorangegangener Untersuchungen richtete. Für den Nachweis von Mikroplastik in der Fulda wurde die Methode des Bulk-Water-Sampling nach Hidalgo-Ruz et al. 2012 gewählt. Die Anzahl der Proben, die durch das Labor analysiert worden sind, war zudem durch das zur Verfügung stehende Budget auf 11 Exemplare beschränkt (Abb. 5).



Abb. 5: Proben nach Lieferung an die Wessling GmbH in Altenberge am 14.12.2019.

Das in dieser Studie angewandte Verfahren der Raman-Spektroskopie eignet sich besonders gut zur Detektion von kleinsten Partikeln (außer Reifenabrieb) bis zu einer Untergrenze von $>1\mu\text{m}$. Zudem lässt sich feststellen, aus welcher Art von Material die Mikroplastik-Partikel bestehen, was bei mehreren möglichen Einträgen für die spätere Interpretation von Vorteil ist. Dies wird ermöglicht, indem die Wechselwirkungen zwischen Lichteinstrahlung und Materie genutzt werden, um Einblicke in den Aufbau des untersuchten Materials zu gewinnen. Die sog. Elastische Streuung (auch Rayleigh-Streuung) bezeichnet den Vorgang der Streuung von Photonen, die in einer Flüssigkeit, einem Gas oder einem Feststoff einfallen. Ein sehr kleiner Anteil dieser gestreuten Photonen (ca. 1 Photon von 10 Millionen) wird mit einer, sich vom Einfallswinkel unterscheidenden Frequenz gestreut. Dieser Unterschied ist messbar und wird als inelastische Streuung oder auch als Raman-Streuung (benannt nach Sir C. V. Raman, 1930 für diese Entdeckung ausgezeichnet mit dem Physik-Nobelpreis) bezeichnet. Somit wird es ermöglicht, die spezifische Schwingungssignatur eines Moleküls zu erfassen und daraus dessen Struktur abzuleiten (Demtröder 1996).

Das analytische Unternehmen Wessling GmbH behandelte die Proben für die anschließende Mikro- und Nanoanalyse zunächst durch Siebung und dann durch eine Kombination von chemischen, physikalischen und enzymatischen Prozessen (WES 984: 2017-08). Somit wurde gewährleistet, dass die enthaltenen Kunststoff-Partikel von anorganischem und biologischem Material getrennt wurden. Anschließend erfolgte die Aufkonzentration der enthaltenen Partikel, um sie auf geeignete Planfilter (Porengröße: $0,8\mu\text{m}$) abzuscheiden. Das Labor untersuchte die Proben im weiteren Verlauf mikroskopisch und ramanspektroskopisch anhand eines Raman-Mikroskops der Firma WITec (Typ: alpha300R). Nachdem lichtmikroskopische Aufnahmen der Filter angefertigt wurden (Abb. 3), analysierte das Labor mehrere

charakteristische Stellen des Filters mit Laserlicht (Wellenlänge: 532nm, (WES 1192)). Die darauf folgende Auswertung der Daten erfolgte mittels der Software „Particle Scout“ und durch einen anschließenden Abgleich der gemessenen Raman-Spektren mit einer allgemeinen Datenbank (ST Japan Abgleich 2017; 15.538 Einzelspektren).

Die erzielten Ergebnisse der Analyse wurden in einem, dieser Arbeit angehängten 26-seitigen Bericht (CAL-26412-19; vorgelegt am 21.02.2019) zusammengefasst und dienen als Grundlage für diese Untersuchung.

2.5 – Analytik (Methodenvergleich)

Zusätzlich zu den Ergebnissen der ramanspektroskopischen Analyse durch die Wessling GmbH, welche unter 3.1 vorgestellt werden, hat der Autor eine eigene Untersuchung in Anlehnung an ein wissenschaftliches Protokoll nach Masura et al. (2015) vorgenommen. Das Ziel dieser optionalen Methode war es zu überprüfen, ob sich Mikroplastik in den Proben auch ohne aufwendige Labortechnik nachweisen lässt. Vorbild dafür waren verschiedene Citizen Science Projekte, in denen umweltbewusste Menschen (Beispiel: Ehrenamtliche des „Civic Laboratory for Environmental Action Research“ (CLEAR)) auf den Eintrag von Mikroplastik in die Gewässer aufmerksam machen wollen. Dabei orientieren sie sich oftmals an den oben genannten Autoren und deren vorgestellter Methodik.

Zunächst wurde das Wasser der jeweiligen Probe von darin enthaltenen Feststoffen getrennt. Dies geschah über die Verwendung von Papier-Filtern (Schleicher & Schuell: Folded Filters; \varnothing 150mm) und eines zusammengesetzten Trennapparates, dessen Aufbau aus einer Vakuumpumpe, einem Erlenmeyer-Kolben und einer Filter-Halterung aus Keramik bestand (Abb. 6).



Abb. 6: Trennapparat.



Abb. 7: Schwebstoffe auf Papierfilter.

Nachdem das Wasser der Proben gefiltert wurde, sammelten sich die festen Schwebstoffe auf den Papierfiltern, welche für eine mittelschnelle Filtration (70 s/100ml, Porengröße 4 -7 μ m) geeignet sind. (Abb. 7). In einem weiteren Schritt wurden die Filter in Aluminiumbehältern gelagert und für 24 Std. in einem Trockenschrank (Memmert: UL 50ü) bei 75°C getrocknet (Abb. 8). Im Anschluss daran wurden die Schwebstoffe auf den Filtern unter einem Stereomikroskop (ZEISS, Stemi 508) auf Mikroplastik bestimmt und ausgezählt (Abb.9), die Ergebnisse wurden schriftlich dokumentiert.



Abb. 8: Proben in Trockenschrank.



Abb. 9: Visuelle Bestimmung unter ZEISS; Stemi 508.

2.6 – Statistik

Um die Ergebnisse statistisch auszuwerten und auf eine mögliche Korrelation zwischen Entfernung zur Quelle und Anreicherung der Mikroplastik-Partikel im Oberflächenwasser zu prüfen, wurde die Software „R“ (R version 3.5.2 (2018-12-20) -- "Eggshell Igloo") verwendet und eine Regressionsanalyse durchgeführt.

3. Ergebnisse

Wie in 1.5 beschrieben, ist die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit der Nachweis von Mikroplastik in der Quelle sowie im weiteren, oberen Verlauf der Fulda. Des Weiteren wird eine, mit steigender Entfernung zur Quelle korrelierende Anreicherung von Mikroplastik im Oberflächenwasser vermutet. Im Folgenden (3.1.1 – 3.1.11) werden zunächst für jede einzelne Probe die Ergebnisse vorgestellt, die durch das Labor der Wessling GmbH anhand von Raman-Spektroskopie erzielt worden sind. Die Auswertung des Methodenvergleichs wird in 3.3 beschrieben und unter 3.4 wird gezeigt, ob ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Partikel-Konzentration und der Entfernung zur Quelle besteht.

3.1 – Nachweis von Mikroplastik

Um Mikroplastik nachzuweisen, wurden die Proben nach dem, in 2.4 beschriebenen Verfahren, ramanspektroskopisch durch die Wessling GmbH untersucht. Die Abbildung 9 (Abb. 9) zeigt exemplarisch den Planfilter der Probe 19-212075-06, auf dem rot gefärbte Mikroplastik-Partikel zu erkennen sind. Um das Material der Schwebstoffe und die Anzahl der Partikel zu identifizieren, wurden in jeder Probe repräsentative Anteile der Partikel spektroskopiert und die Ergebnisse anschließend auf den gesamten Filter extrapoliert.

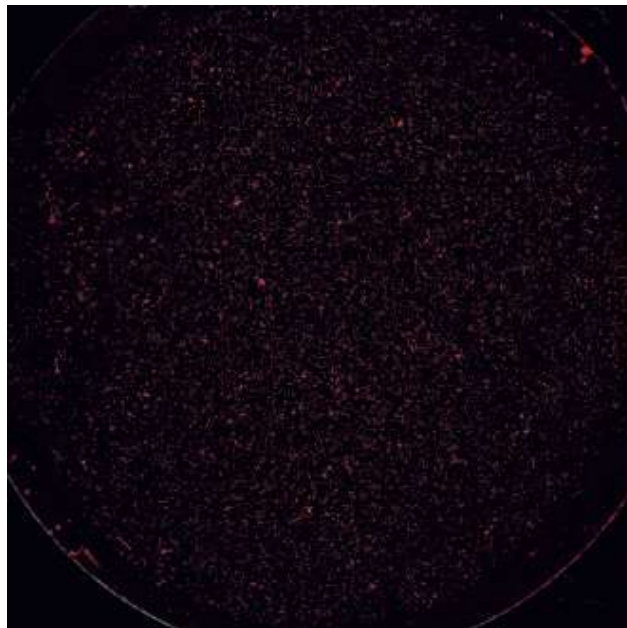


Abb. 9: Planfilter der Probe 19-212075-06, Mikroplastik-Partikel rot gefärbt.

3.1.1 – Fuldaquelle (19-212075-01)

In dieser Probe wurden insgesamt $n = 355$ Mikroplastik-Partikel gezählt, welche aus den Kunststoffen Polyethylenerephthalat (**PET**; $n = 142$) und Polystyrol (**PS**; $n = 213$) bestehen (Tab 3).

Tabelle 3: Anzahl Partikel (n) nach Art des Kunststoff aufgeteilt und nach Größe fraktioniert; 19-212075-01.

Material	6 - 10 μm	10 - 50 μm	50 - 100 μm	100 - 500 μm	500 - 5000 μm
PET	0	142	0	0	0
PS	0	142	71	0	0

3.1.2 – Landwirtschaft 1 (19-212075-02)

In dieser Probe wurden insgesamt $n = 213$ Mikroplastik-Partikel gezählt, welche aus dem Kunststoff Polystyrol (**PS**; $n = 213$) bestehen (Tab. 4).

Tabelle 4: Anzahl Partikel (n) nach Art des Kunststoff aufgeteilt und nach Größe fraktioniert; 19-212075-02.

Material	6 - 10µm	10 - 50µm	50 - 100µm	100 - 500µm	500 - 5000µm
PS	0	142	71	0	0

3.1.3 – Landwirtschaft 2 (19-212075-03)

In dieser Probe wurden insgesamt n = **117** Mikroplastik-Partikel gezählt, welche aus dem Kunststoff Polystyrol (PS; n = **117**) bestehen (Tab. 5).

Tabelle 5: Anzahl Partikel (n) nach Art des Kunststoff aufgeteilt und nach Größe fraktioniert; 19-212075-03.

Material	6 - 10µm	10 - 50µm	50 - 100µm	100 - 500µm	500 - 5000µm
PS	0	117	0	0	0

3.1.4 – Baustoffgesellschaft 1 (19-212075-04)

In dieser Probe wurden keinerlei Mikroplastik-Partikel gefunden. Mögliche Ursachen dafür werden in 4.1 diskutiert.

3.1.5 – Baustoffgesellschaft 2 (19-212075-05)

In dieser Probe wurden insgesamt n = **137** Mikroplastik-Partikel gezählt, welche aus den Kunststoffen Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (**ABS**; n = **136**) und Polypropylen (**PP**; n = **1**) bestehen (Tab. 6).

Tabelle 6: Anzahl Partikel (n) nach Art des Kunststoff aufgeteilt und nach Größe fraktioniert; 19-212075-05.

Material	6 - 10µm	10 - 50µm	50 - 100µm	100 - 500µm	500 - 5000µm
ABS	0	136	0	0	0
PP	0	0	0	1	0

3.1.6 – A7 (19-212075-06)

In dieser Probe wurden insgesamt n = **78** Mikroplastik-Partikel gezählt, welche aus den Kunststoffen Polyethylenerephthalat (**PET**; n = **27**) und Polypropylen (**PP**; n = **51**) bestehen (Tab. 7).

Tabelle 7: Anzahl Partikel (n) nach Art des Kunststoff aufgeteilt und nach Größe fraktioniert; 19-212075-06.

Material	6 - 10µm	10 - 50µm	50 - 100µm	100 - 500µm	500 - 5000µm
PET	0	26	0	1	0
PP	0	0	51	0	0

3.1.7 – A66 (19-212075-07)

In dieser Probe wurden insgesamt $n = 472$ Mikroplastik-Partikel gezählt, welche aus den Kunststoffen Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (**ABS**; $n = 118$), Polystyrol (**PS**; $n = 118$), Polyethylen (**PE**; $n = 118$) und Polypropylen (**PP**; $n = 118$) bestehen (Tab. 8).

Tabelle 8: Anzahl der Partikel (n) nach Art des Kunststoff aufgeteilt und nach Größe fraktioniert; 19-212075-07.

Material	6 - 10 μm	10 - 50 μm	50 - 100 μm	100 - 500 μm	500 - 5000 μm
ABS	0	118	0	0	0
PS	0	118	0	0	0
PE	0	118	0	0	0
PP	0	0	118	0	0

3.1.8 – Wertstoffhof 1 (19-212075-08)

In dieser Probe wurden keinerlei Mikroplastik-Partikel gefunden. Mögliche Ursachen dafür werden in 4.1 diskutiert.

3.1.9 – Wertstoffhof 2 (19-212075-09)

In dieser Probe wurden insgesamt $n = 326$ Mikroplastik-Partikel gezählt, welche aus dem Kunststoff Polyethylenerephthalat (**PET**; $n = 326$) bestehen (Tab. 9).

Tabelle 9: Anzahl Partikel (n) nach Art des Kunststoff aufgeteilt und nach Größe fraktioniert; 19-212075-09.

Material	6 - 10 μm	10 - 50 μm	50 - 100 μm	100 - 500 μm	500 - 5000 μm
PET	0	184	71	71	0

3.1.10 – Kläranlage 1 (19-212075-10)

In dieser Probe wurden insgesamt $n = 205$ Mikroplastik-Partikel gezählt, welche aus dem Kunststoff Polyethylenerephthalat (**PET**; $n = 205$) bestehen (Tab. 10).

Tabelle 10: Anzahl Partikel (n) nach Art des Kunststoff aufgeteilt und nach Größe fraktioniert; 19-212075-10.

Material	6 - 10 μm	10 - 50 μm	50 - 100 μm	100 - 500 μm	500 - 5000 μm
PET	205	0	0	0	0

3.1.11 – Kläranlage 2 (19-212075-11)

In dieser Probe wurden insgesamt $n = 58$ Mikroplastik-Partikel gezählt, welche aus dem Kunststoff Polyethylenerephthalat (**PET**; $n = 58$) bestehen (Tab. 11).

Tabelle 11: Anzahl Partikel (n) nach Art des Kunststoff aufgeteilt und nach Größe fraktioniert; 19-212075-11.

Material	6 - 10 μm	10 - 50 μm	50 - 100 μm	100 - 500 μm	500 - 5000 μm
PET	0	58	0	0	0

3.2 – Übersicht

Die Wessling GmbH detektierte in 11L Flusswasser insgesamt 1.961 Mikroplastik-Partikel im Größenbereich $6\mu\text{m} - 500\mu\text{m}$. Dabei wurde die höchste Konzentration von 472 Partikel/L in der Probe A66 (19-212075-07) gemessen, wobei mathematisch ein Mittelwert von 178,27 Partikel/L Flusswasser zu bestimmen ist. Der Großteil der als Kunststoff identifizierten Partikel ist kleines Mikroplastik (siehe Definition unter 1.3) und liegt im Größenbereich von $10\mu\text{m} - 50\mu\text{m}$; $n = 1.326$. Am wenigsten häufig waren größere Partikel ($100\mu\text{m} - 500\mu\text{m}$; $n = 73$). Großes Mikroplastik ($1.000\mu\text{m} - 5.000\mu\text{m}$) sowie Meso- oder Makroplastik befanden sich nicht in den Proben. Des Weiteren wurden keinerlei Partikel in den Proben Baustoffgesellschaft 1 (19-212075-04) und Wertstoffhof 1 (19-212075-08) gefunden. Abbildung 10 (Abb. 10) zeigt alle detektierten Partikel, aufgeteilt nach Material und Größe in einer grafischen Übersicht. Aufteilung nach Material: PET ($n = 758$); PS ($n = 661$); ABS ($n = 254$); PP ($n = 170$) & PE ($n = 118$).

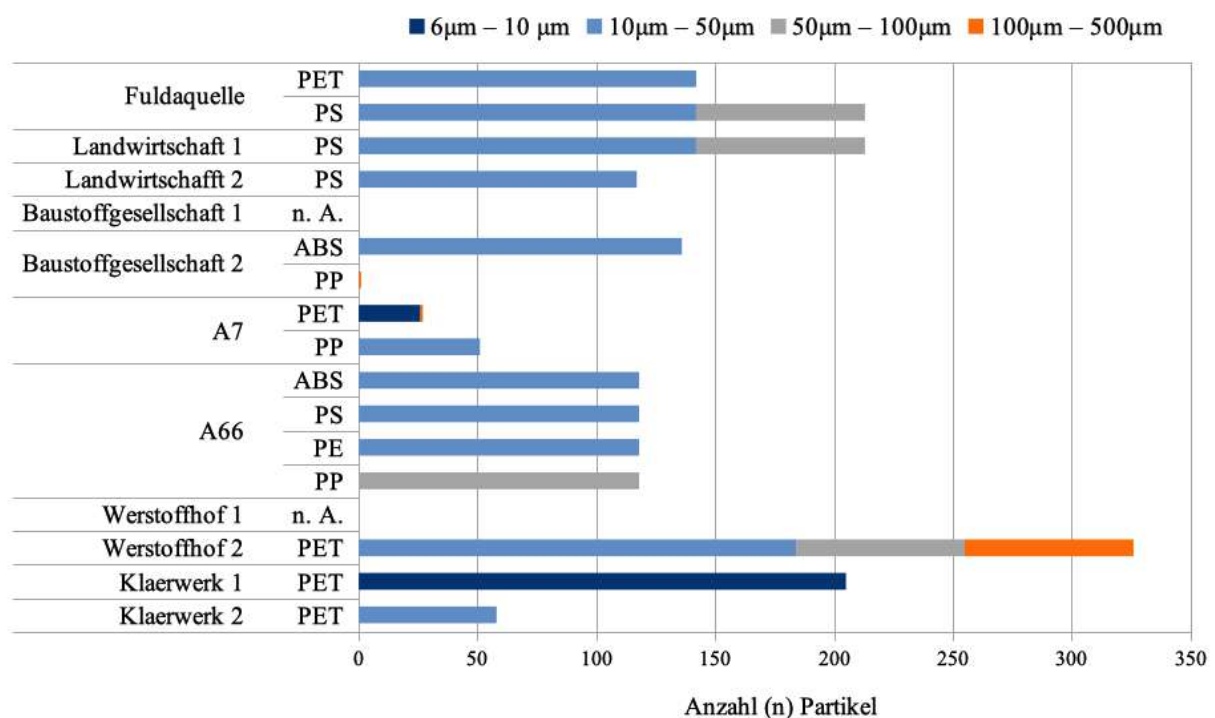


Abb. 10: Anzahl der Mikroplastik-Partikel (n) aus 11 Proben, jeweils aufgeteilt in Material und Größenbereiche ($6\mu\text{m} - 10\mu\text{m}$: $n = 231$; $10\mu\text{m} - 50\mu\text{m}$: $n = 1326$; $50\mu\text{m} - 100\mu\text{m}$: $n = 331$; $100\mu\text{m} - 500\mu\text{m}$: $n = 73$).

3.3 – Methodenvergleich

Dem Autor war es ein Anliegen zu überprüfen, ob Mikroplastik in Vergleichsproben auch mit verhältnismäßig wenig Aufwand nachzuweisen ist. Dabei orientierte er sich wie in 2.5 beschrieben an einem wissenschaftlichem Protokoll nach Masura et al. (2015) und zählte die Proben anhand eines Bestimmungs-Schlüssels für Mikroplastik (Civic Laboratory for

Environmental Action Research (CLEAR): „Spotter’s Guide to Plastic Pollution“; im Anhang (7.) visuell aus. Die Abbildungen 11 & 12 (Abb. 11 & Abb. 12) zeigen Fotos von Mikroplastik-Fasern unter einem Stereomikroskop (ZEISS; Stemi 508).

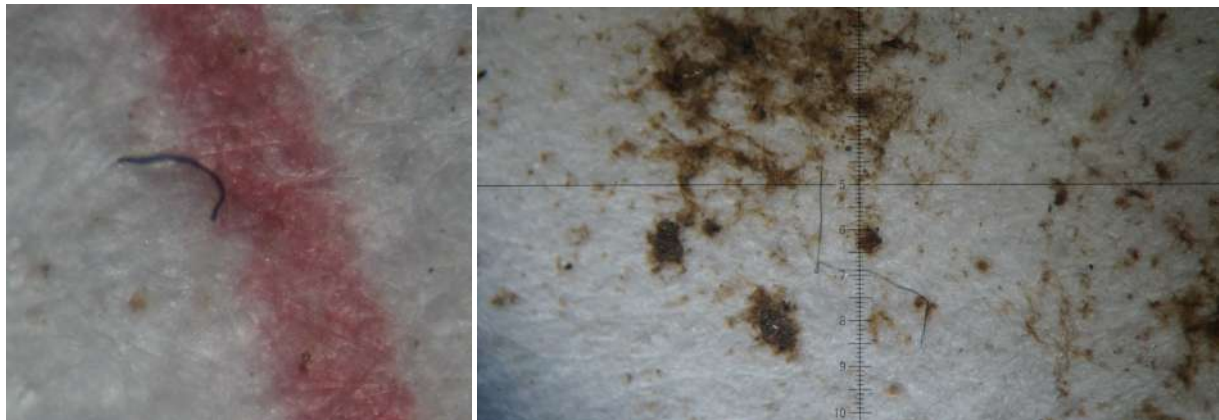


Abb. 11: Kunststoff-Faser, 8-fache Vergrößerung. Abb. 12:Kunststoff-Faser, 4-fache Vergrößerung.

In Abbildung 13 (Abb. 13) ist die Verteilung der als Mikroplastik identifizierten Partikel und Fasern dargestellt. Hierbei ist zu erwähnen, dass nur die Form der Objekte als Bestimmungsmerkmal für Mikroplastik diente. In den 11 Proben sind insgesamt 318 Partikel gefunden worden und der Mittelwert dieser Zählung liegt bei 28,81 Partikel/L Flusswasser.

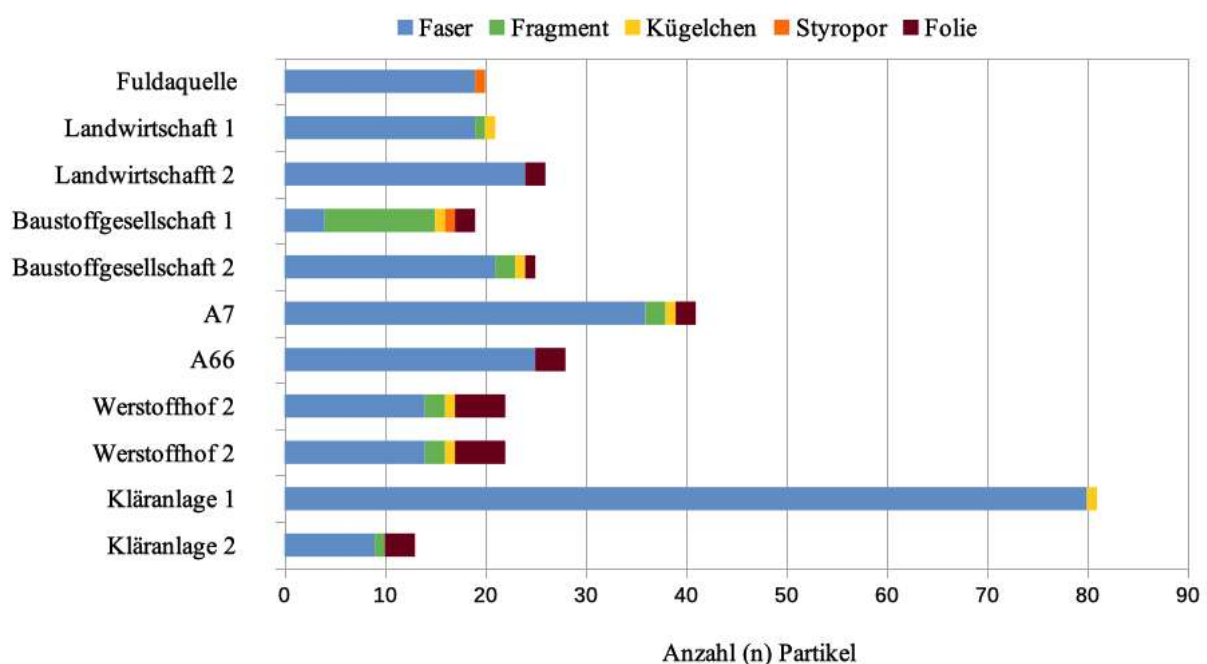


Abb. 13: Anzahl der Mikroplastik-Partikel (n) aus 11 Proben, jeweils aufgeteilt nach Form der Objekte.

3.4 – statistische Analyse

Wie bereits eingangs unter 1.5 erwähnt, soll im Rahmen der Bachelorarbeit die Arbeitshypothese (H_1): „Mit zunehmender Entfernung zur Quelle der Fulda nimmt der Anteil

an Mikroplastik im Oberflächenwasser zu.“ überprüft werden. Diese Annahme wurde im Vorfeld getroffen, da in zahlreichen Studien zum Thema genau dieser Effekt nachgewiesen wurde, beispielsweise im Oberflächenwasser des Flusses Rhein (Heß, 2018). Um eine eventuelle Korrelation aufzuzeigen, wurden die Daten anhand einer Regressionsanalyse nach Crawley (2013) mit R ausgewertet (Abb. 14).

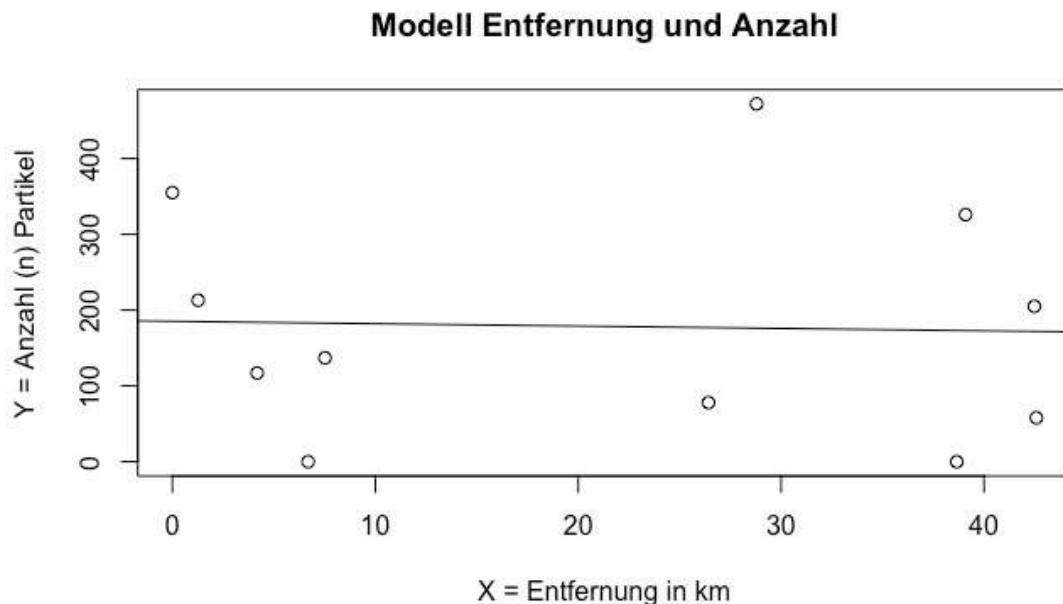


Abb. 14: Regressionsanalyse (lineare Regression) des Datensatzes „Anzahl (n) Partikel + Entfernung“.

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-183.06	-106.14	-45.79	93.38	296.03

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	185.2037	78.9134	2.347	0.0435 *
X	-0.3208	2.8750	-0.112	0.9136

Residual standard error: 161.4 on 9 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.001381, **Adjusted R-squared:** -0.1096

F-statistic: 0.01245 on 1 and 9 DF, **p-value:** 0.9136

Eine einfache lineare Regression mit „Entfernung“ als der unabhängigen und „Anzahl (n) Partikel“ als der erklärenden Variable ist demnach nicht signifikant (p-value: 0.9136). Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen Entfernung zur Quelle und der Anzahl von Partikeln, die Arbeitshypothese H_1 wird verworfen.

4. Diskussion

Die grundlegenden Ziele dieser Bachelorarbeit (siehe 1.5) sind durch die angewandten Methoden nur zum Teil erreicht worden. Zunächst wurde Mikroplastik in der Quelle und im Oberlauf der Fulda nachgewiesen, wobei sich die Interpretation der Ergebnisse jedoch als problematisch gestaltet. Außerdem konnte die vermutete Korrelation von Entfernung der Probenentnahmestellen zur Quelle und Anzahl von Mikroplastik Partikeln nicht nachgewiesen werden, mögliche Gründe für beide Probleme werden jedoch ausführlich unter 4.1 behandelt. Die nachgewiesenen Kunststoffe und ihre Eigenschaften werden unter 4.2 vorgestellt, ebenso werden die möglichen Beziehungen zwischen vermuteten Mikroplastik-Emittenten und gemessenen Konzentrationen von Mikroplastik-Partikeln bewertet. Des Weiteren werden die bekannten gesundheitlichen und ökologischen Folgen in Form eines Literatur-Reviews unter 4.3, 4.4 und 4.5 evaluiert, um der dritten Zielsetzung (siehe 1.5) der vorliegenden Bachelorarbeit gerecht zu werden.

4.1 – Fehlerdiskussion

Wie bereits unter 1.3 beschrieben, existiert bis heute kein standardisiertes Verfahren in Bezug auf Proben-Entnahme und Analytik, wobei bereits zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen zum Thema Mikroplastik vorliegen. Bei der letztjährigen Teilnahme des Autors an der Abschlusskonferenz der MiWa (persönliches Gespräch, „Mikroplastik im Wasserkreislauf“ (MiWa); BMBF-Vorhaben) wurde deutlich, dass die Art der Probenentnahme stark variiert, je nach dem, welche Fragestellung bearbeitet werden soll und wie viel finanzielles Budget für die Analytik vorgesehen ist. Durch den letzten genannten Punkt wurden die Möglichkeiten zur Bearbeitung der Fragestellung, ob Mikroplastik in der Fulda zu finden ist, stark limitiert, da der Autor auf die Zusammenarbeit mit dem analytischen Labor Wessling GmbH angewiesen war. Die Dienstleistung der Probenanalyse war somit nur für 11 Stichproben (1 Liter Bulk-Water-Proben) zu finanzieren, denn andere existierende Methoden zur Probenentnahme entsprachen nicht den finanziellen Möglichkeiten.

Dieser Art der Stichprobe ist es auch zuzuschreiben, dass die zu erwartende Anreicherung von Partikeln im Oberflächenwasser mit zunehmender Entfernung zur Quelle nicht nachweisbar ist und keine Korrelation zwischen den beiden Variablen aus den Daten hervorgeht. Es ist wahrscheinlich, dass diese Art der Beprobung stark von örtlich beschränktem Eintrag von Mikroplastik abhängig ist. Gibt es beispielsweise oberhalb einer Probe-Entnahmestelle ein sich durch UV-Licht und mechanische Einwirkungen zersetzendes Stück Makroplastik (wie etwa eine landwirtschaftlich genutzte Folie), so ist eine hohe Konzentration an Partikeln an

diesem Ort im Fluss garantiert und trifft letztendlich keine repräsentative Aussage in Bezug auf die Gesamtheit der Partikel im Flussquerschnitt.

Aus demselben Grund lassen sich die fehlenden Messwerte der beiden Proben „Baustoffgesellschaft 1“ (19-212075-04) und „Kläranlage 1“ (19-212075-10) erklären. Dadurch, dass der Experimentator anhand der Stichproben nur zu einem bestimmten Zeitpunkt einen äußerst kleinen Bereich der Wassersäule beproben kann, ist ein Fehlen von Mikroplastik-Partikeln darzulegen.

Da im Einzelfall die Ansammlung von Mikroplastik-Partikeln in der Fulda im Verhältnis zu anderen Fließgewässern sehr hoch ist (Emscher: bis zu 0,2143 Partikel/L (Heß 2018); Fulda: bis zu 472 Partikel/L) sind diese extremen Diskrepanzen wiederum auf das Design der Proben zurück zu führen und sind vermutlich Artefakte.

In Bezug auf den durchgeführten Nachweis von Mikroplastik nach Masura et al. (2015) sind ebenfalls mögliche Fehlerquellen zu erwähnen, insbesondere die wahrscheinlich erfolgte Verunreinigung der Proben während des Vorgangs der Trennung von Flüssigkeit und Schwebstoffen im Labor. Denn obwohl der Autor während der Probenbearbeitung mit einem Baumwollkittel bekleidet war und mit größter Sorgfalt gearbeitet hat, war es nicht möglich eine in Bezug auf Kontamination durch Mikroplastik sterile Umgebung zu schaffen. Mikroplastik ist ubiquitär in jedem Medium vorzufinden, deshalb gelten durch Mikroplastik aus der Umgebungsluft verunreinigte Laborräume als größte Fehlerquelle in der Analytik, da hier eine Verunreinigung der Proben nicht auszuschließen ist (Li, Liu, Chen 2017). Zudem ist die visuelle Auswertung mit bis zu 70% stark fehlerbehaftet und stellt leider keine ernsthafte Alternative zu spektroskopischen Analysen dar (Bertling, Bertling, Hamann 2018).

Zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen im Bereich der Mikroplastik-Analyse von ähnlichem Charakter sollten geeignetere Methoden zur Proben-Entnahme wählen. Zu nennen sind hier beispielsweise sog. „Manta-Trawls“ (siehe 2.3) und ein vielfaches der Probenanzahl der vorliegenden Arbeit, um so repräsentative Daten erheben zu können (Barrows 2017).

4.2 – nachgewiesene Kunststoffe

Neben den beschriebenen möglichen Fehlerquellen ist jedoch zu betonen, dass der Nachweis von Mikroplastik in der Fulda gelungen ist. Im Zuge dieser Untersuchung wurden fünf verschiedene Kunststoffarten (PET, PP, ABS, PS & PE) in den oberen 10 cm des Oberflächenwassers gefunden. Alle Partikel (bis auf ABS) sind außerdem den sechs häufigsten Plastiksorten zuzuschreiben. Die einzelnen Stoffe und deren Eigenschaften sind im folgenden Abschnitt vorgestellt. Einen Bezug zu den vermuteten Mikroplastik-Emittenten herzustellen gestaltet sich jedoch als stark spekulativ und als nicht zielführend.

4.2.1 – Polyethylenterephthalat (PET), n = 758; 38,65% der Gesamtmenge

PET ist ein Thermoplast und ein vielseitig eingesetzter Kunststoff. Dieses Material wird zu Lebensmittelverpackungen (PET-Flasche) oder zur Herstellung von künstlichen Textilfasern (Polyester) genutzt. Darüber hinaus findet es vielfache Anwendungen als sog. Polyesterfolie.

4.2.2 – Polystyrol (PS), n = 661; 33,70% der Gesamtmenge

Dieser Kunststoff ist ein Thermoplast und wird vorwiegend als Verpackungsmaterial in der Lebensmittelindustrie in Form von Joghurtbechern oder Folien eingesetzt. Sog. Expandiertes Polystyrol (EPS) ist besser bekannt unter dem Namen „Styropor“ und findet vielfältigen Einsatz als Dämm- oder als Verpackungsmaterial.

4.2.3 – Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS), n = 254; 12,95% der Gesamtmenge

Dieses Copolymer wird vielfach verwendet, vor Allem in der Elektro- und in der Automobilindustrie um Oberflächen zu galvanisieren. Neben vielen weiteren Einsatzbereichen wird ABS auch für das Verfahren des 3D-Drucks verwendet.

4.2.4 – Polypropylen (PP), n = 170; 8,66% der Gesamtmenge

Polypropylen ist ein neuartiger Thermoplast und wird verstärkt an Stelle von ABS eingesetzt, da das Einsatzgebiet dieses Kunststoffes sehr breit ist und über ähnliche Eigenschaften wie die meisten anderen Thermoplaste verfügt.

4.2.5 – Polyethylen (PE), n = 118; 6,01% der Gesamtmenge

Polyethylen ist der mit Abstand am häufigsten produzierte Kunststoff der Welt und hat, ähnlich wie Polypropylen, einen sehr breiten Einsatzbereich.

4.3 – ökologische Folgen

Wie eingangs bereits erwähnt (siehe 1.4), existieren zahllose diffuse Eintragwege für Mikroplastik in die Umwelt und in limnische Systeme. Über die Auswirkungen von Mikroplastik auf Süßgewässer ist bisher nicht sonderlich viel bekannt, jedoch weiß man von marinen Systemen, dass sie als Ort der Akkumulation für verschiedene Umweltgifte fungieren und darüber hinaus sehr anfällig für Störungen sind. Wie wirken sich demnach Mikroplastik-Partikel auf die limnischen Ökosysteme aus und welche zusätzlichen Stoffe gelangen außerdem zusammen mit den Kunststoffen in die Fließgewässer? Wenn momentan keine Grenzwerte zu Mikroplastik in der Umwelt existieren (Wessling GmbH, 2020), wie wäre die Festlegung solcher Begrenzungen zu begründen und wie hoch müssten die Werte sein? Diesen und vielen weiteren Fragen widmen sich zahlreiche wissenschaftliche Publikationen, welche die Grundlage für einen Überblick zu dieser Thematik darstellen.

Um jedoch einschätzen zu können, wie komplex die Auswirkungen von Mikroplastik sind, muss der Autor zunächst noch einmal auf den Aufbau der Kunststoffe zu sprechen kommen. Wie unter 1.2 beschrieben, werden Kunststoffe nach ihrem Aufbau und ihren Eigenschaften in die drei Großgruppen Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste aufgeteilt (Elias 2003). Thermoplaste sind aus unzähligen aneinandergereihten Monomeren in linear angeordneten Kohlenstoffketten aufgebaut und stellen den Großteil des produzierten Plastiks dar. Wenig vernetzte Kunststoff-Typen zählen zu den Elastomeren, wobei Duroplaste wiederum stark vernetzt und deshalb auch besonders stabil sind. Diese Form des thermoplastischen Kunststoffes hat aufgrund des Aufbaus physikalische Eigenschaften, die zu einer schnellen Zersetzung durch äußere Einflüsse in der Umwelt führen und gilt daher als größte Quelle von Mikroplastik-Partikeln. Um die beschriebenen Eigenschaften der Kunststoffe in den Endprodukten hervorzurufen, oder deutlich zu verbessern, werden dem Plastik in der Produktion bestimmte Additive zugegeben. Darunter finden sich unter Anderem Farbstoffe, Weichmacher, Flammschutzmittel und UV-Stabilisatoren. Manche Zusatzstoffe sind von sich aus bereits toxisch, was beispielsweise auf Phtalate, Nonylphenol (welcher als krebserregend gilt), andere Inhibitoren oder auf das vielfach in der Presse diskutierte Bisphenol A zutrifft (Liebezeit, Dubaish 2012). Sobald Plastik jeglicher Größe in eine aquatische Umgebung gelangt, werden die ohnehin schon schnell voranschreitenden Zersetzungsprozesse durch zusätzliche mechanische Belastung begünstigt und die Kunststoffe zerfallen in immer kleinere Einheiten. Die oben erwähnten zugegebenen Stoffe sind nicht chemisch an die Kunststoffe gebunden und werden durch den Zerfall an das umgebende

Medium abgegeben, wodurch sensible, im Wasser lebende Organismen stark gefährdet werden (Fath 2019).

Die weitaus größere Gefahr stellen jedoch nicht die Additive dar, sondern die Mikroplastik-Partikel selbst, welche auf ihrer Oberfläche zudem Schwermetalle aufnehmen oder als Vehikel für multiresistente Keime und andere Pathogene dienen können. Die Partikel werden mitsamt den enthaltenen Toxinen und den Ansammlungen von Stoffen auf der Oberfläche von Organismen aufgenommen (Barnes et al. 2009). Dies geschieht, da die Partikel aufgrund der ähnlichen Größe zum Beutespektrum für Nahrung gehalten werden. Diese 1,7 – 30,6µm großen Partikel werden nachweislich von Zooplankton aufgenommen (Cole et al. 2013), was zu einer Verstopfung des Magen-Darm-Traktes bei einzelnen Individuen führen kann. Indirekt kann auch ein „Sättigungsgefühl“ eintreten, hervorgerufen durch übermäßige Aufnahme von Mikroplastik-Partikeln und deren Verbleib im Magen-Darm-Trakt, was die Individuen daran hindert, weitere Nahrung zu konsumieren. Somit stirbt Zooplankton in Massen ab und/oder stellt eine vergiftete Nahrungsquelle für in der Nahrungskette höher gestellte Organismen dar. Die trophische Ebene, die sich von Zooplankton ernährt, ist demnach mit Mikroplastik und den Additiven kontaminiert, welche von den Organismen aufgenommen werden können (Oehlmann et al. 2009). Untersuchungen an Fischen im Ärmelkanal (Lusher et al. 2013) und an Seevögeln im Mittelmeer-Raum (Codina-Garcia et al. 2013) belegen diesen Zusammenhang. Zudem wurden Aufnahme und Anreicherung von Mikroplastik-Partikeln bis zu einer Größe von 80µm im Fettgewebe und in inneren Organen von Miesmuscheln (*Mytilus edulis*) (Moos 2010) und in Austern (*Crassostrea gigas*) (van Cauwenberghe, Janssen 2014) nachgewiesen, welche zu schweren Erkrankungen führen können. Als Additive hinzugegebene Weichmacher (Phtalate & Bisphenol A) stehen vermutlich im Zusammenhang mit verschlechterten Entwicklungsbedingungen und Reproduktionsraten von Fischen, Krebstieren, Weichtieren und Amphibien (Oehlmann et al. 2009). Eine weitere Vermutung, die bisher jedoch nicht durch Langzeitstudien untermauert werden kann, besagt, dass das Hormonsystem von Schwertfischen (*Xiphias gladius, L*) und Eisbären (*Ursus maritimus*) durch synthetisch hergestellte Pestizide gestört worden ist und dies zu Ausprägungen von intersexuellen Geschlechtsmerkmalen führte (Wiig et al. 1998).

Die Erkenntnisse bezüglich der Auswirkungen von Mikroplastik in der aquatischen Umwelt sind nach Ansicht des Autors auch zum Teil auf in der Fulda lebende Filtrierer (wie zum Beispiel Rädertierchen (*Rotifera sp.*)) und auf Krebstiere, Mollusken sowie auf diverse Fischarten zu übertragen, was weitere Studien belegen könnten. Mikroplastik stellt demnach

nicht nur eine direkte Gefährdung für die Bewohner des marinen Ökosystems dar, sondern wirkt sich auch negativ auf limnische Systeme und auf die Biodiversität aus. Nicht kontrollierte Einträge von Mikroplastik führen nur zu weiteren negativen Entwicklungen, deren Folgen durch fehlende Untersuchungen noch nicht abzusehen sind.

4.4 – gesundheitliche Gefahren

Durch den Konsum von Meeresfrüchten läuft der Mensch als Endverbraucher Gefahr, ebenfalls Mikroplastik und enthaltene sowie anhaftende Schadstoffe aufzunehmen. Obwohl die bisherigen Erkenntnisse nicht ausreichen, um eine wirkliche Gefährdung nachzuweisen, wird die Öffentlichkeit besonders durch Beiträge in der Presse für das Thema Mikroplastik in Lebensmitteln sensibilisiert. So titelten mehrere Zeitschriften im vergangenen Jahr dass jede/r Verbraucher/in wöchentlich eine Menge von 8g Plastik (äquivalent zum üblichen Gewicht einer Kreditkarte) zu sich nimmt. Diese Meldung bedarf jedoch dem Zusatz, dass bisher keine Aufnahme von Mikroplastik in den menschlichen Körper nachgewiesen wurde. Somit werden aufgenommene Kunststoffe mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder ausgeschieden, wobei nicht ausgeschlossen werden kann, dass schädliche Stoffe während der Darmpassage abgegeben werden (Grummt, Kuckelkorn, Strobel 2019). Nichtsdestotrotz veranschaulicht eine Studie aus dem Jahre 2014 das allgegenwärtige Vorkommen von Mikroplastik in unseren Lebensmitteln. Liebezeit und Liebezeit analysierten 24 verschiedene Biersorten und wiesen in allen Produkten Mikroplastik nach. Die Konzentrationen von 5 – 79 Partikel/L waren dabei weit höher als die gemittelten Vorkommen von Mikroplastik in deutschen Fließgewässersystemen (Beispiel: Emscher: bis zu 0,2143 Partikel/L (Heß 2018)).

Eine weitere, nicht zu vernachlässigende Gefahr stellt der Eintrag von Mikroplastik auf die Felder der Landwirtschaft dar. Kunststoffpartikel werden konventionellem Dünger beigemischt und geraten so über die Ausbringung auf die Böden, wo sie durch photochemische Prozesse zersetzt werden und somit ihre Inhaltsstoffe an das Grundwasser abgeben.

4.5 – Lösungsansätze

Aufgrund der andauernden Verschmutzung der Meere und der Fließgewässer und der damit verbundenen ökologischen Folgen ist es äußerst dringlich, die Plastikflut einzudämmen. Um auf das Thema Mikroplastik aufmerksam zu machen wurde ein 2014 in der Tiefsee entdeckter Amphipode (*Eurythenes plasticus*) nach der Polyester-Faser benannt, die in dem gefangenen

Tier gefunden wurde. Der World Wild Fund For Nature (WWF) versucht zusammen mit anderen Organisationen (wie beispielsweise Greenpeace) anhand von Petitionen Druck auf politischer Ebene auszuüben, um dem Eintrag von Plastik in die Umwelt durch Gesetze entgegenzutreten. Eine andere Art der Prävention wäre der in 1.2 erwähnte Ausbau von Recycling-Systemen in Entwicklungs- sowie in Schwellenländern. Nach deutschem Vorbild könnten hierbei Anreize durch finanzielle Verpflichtungen gesetzt werden, die für Unternehmen gelten, welche Plastik als Verpackungen in Umlauf bringen. Außerdem ist es notwendig, mehr Forschung in der Entwicklung von biologisch abbaubaren Kunststoffen zu betreiben, oder, wie zu Beginn des Jahres 2020 in Deutschland geschehen, ein Verbot von Einweg-Plastiktüten auszusprechen. Zudem ist die Kosmetikindustrie dringend dazu angehalten, auf zugesetztes Mikroplastik in den Produkten zu verzichten um die Abwässer zu entlasten und die Technik der Kläranlagen sollte auf die effektive Filterung von Mikroplastik-Partikeln umgestellt werden. Darüber hinaus ist es durchaus möglich, auch als Einzelperson Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt zu verhindern, indem beispielsweise auf unnötige Autofahrten weitgehend verzichtet, oder Kleidung aus natürlichen Faserstoffen getragen wird.

5. Zusammenfassung

Um den Verlauf und die Ergebnisse der Bachelorarbeit in einem abschließenden Teil zu behandeln, ist es nötig noch einmal auf den bisherigen Kenntnisstand im Bereich Mikroplastik im Süßwasser einzugehen. Die wissenschaftliche Welt hat die Dringlichkeit des Monitoring von Plastikeintrag in Süßgewässern erkannt und arbeitet momentan Wissenslücken auf, indem in den letzten drei Jahren zahlreiche Untersuchungen durchgeführt wurden. Dabei werden aktuell viele verschiedene Analyse-Verfahren auf deren Sinnhaftigkeit überprüft und angewandt, was zu einem breiten Spektrum an Publikationen führt. Diesen diversen Voraussetzungen ist es zuzuschreiben, dass sich die Auswahl der Analytik und des Labors als schwierig gestaltete und im Endeffekt dennoch zu einer klaren Aussage führte, nämlich dass der Mittelgebirgsfluss Fulda bereits in der eingefassten Quelle und im weiteren Verlauf Mikroplastik im Oberflächenwasser mit sich trägt. Die vielfältigen und meist diffusen Eintragwege für diese Form von Plastik lassen die Vermutung zu, dass das Vorkommen von Mikroplastik-Partikeln in der Quelle darauf zurück zu führen ist, dass es sich nicht um die natürliche Quelle des Flusses handelt. Eine aktuelle Schätzung der vielen einzelnen Quellen geht auf mindestens 100 Einzelgewässer zurück, die alle in einem künstlichen Bassin gefasst werden (Zaenker, Email 05.06.2020).

Somit sind die detektierten 355 Mikroplastik-Partikel (PET, n = 142; PS, n = 213) im Größenbereich von 10µm – 100µm mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits vor dem im Wasserstrom liegenden Messpunkt Fuldaquelle (19-212075-01) in das Gewässersystem gelangt. Die Ursachen für den Plastikeintrag an dieser Stelle können verschieden geartet sein, es sei nur zu erwähnen dass sich in unmittelbarer räumlicher Nähe eine Straße und ein großer Parkplatz befinden, den jährlich ca. 1 Mio. Tagesgäste nutzen um die Fuldaquelle zu besuchen. Darüber hinaus sind Teile der Wasserkuppe bis 1998 militärisch genutzt worden, was eine Kontamination des Areals mit verschiedensten unnatürlichen Stoffen nicht ausschließt. Eine genaue Lokalisierung der verschiedensten Einträge von Mikroplastik in den Oberlauf der Fulda könnte Bestandteil einer folgenden Untersuchung sein.

Mikroplastik als neuartiges Feld in der Umweltforschung ermöglicht eine relativ freie Wahl der Fragestellung und bietet zahlreiche Möglichkeiten um eine Abschlussarbeit zu erstellen. Deshalb freue ich mich darüber, in Zusammenarbeit mit dem Biosphärenreservat „Rhön“ an einer Aufarbeitung dieser Umweltverschmutzung mitgewirkt zu haben.

An dieser Stelle möchte ich Jonas Thielen, Carolin Müller und Stefan Zaenker danken, die mich während der Vorbereitungszeit, bei der Proben-Entnahme und beim Verfassen der Arbeit unterstützten. Des Weiteren gilt mein Dank meiner Freundin Agatha Czarny, meiner Familie & meinen Freunden, den Mitarbeitern der Wessling GmbH sowie Matthias Waltert und Eckhardt Gottschalk.

6. Literaturverzeichnis

Bannick, Claus G.; Barthel, Anne-Kathrin; Bednarz, Marius; Kerndorff, Alexander; Obermaier, Nathan; Ricking, Matthias (2019): Probennahme und Probenaufarbeitung. In: BMBF-Vorhaben Mikroplastik im Wasserkreislauf (MiWa), Abschlusskonferenz 10.09.2019, Karlsruhe.

Barnes, David K. A.; Galgani, Francois; Thompson, Richard C.; Barlaz, Morton (2009): Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. In: *Phil. Trans. R. Soc. B* 00, S. 1 – 14. DOI:10.1098/rstb.2008.0205

Barrows, Abigail P. W.; Neumann, Courtney A.; Berger, Michelle L.; Shaw, Susan D. (2017): Grab vs. neuston tow net: a microplastic sampling performance comparison and possible advances in the field. In: *Analytical Methods*, volume 9, S. 1446 – 1453. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6AY02387H>

Bergmann, Melanie; Gutow, Lars; Klages, Michael (2015): Marine Anthropogenic Litter. DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3

Bertling, Jürgen; Bertling, Ralf; Hamann, Leandra (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik (Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen). DOI: 10.24406/uMsiCht-n-497117

Biederbick, Karlheinz (1977): Kunststoffe kurz und bündig. ISBN: 9783802300103

Civic Laboratory for Environmental Action Research (CLEAR): Spotter's Guide to Plastic Pollution. <https://civiclaboratory.nl> (Zugriff am 13.03.2020)

Codina-García, Marina; Militão, Teresa; Moreno, Javier; González-Solís, Jacob (2013): Plastic debris in Mediterranean seabirds. In: *Marine Pollution Bulletin* 77, S. 220 – 226. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.10.002

Cole, Matthew; Lindeque, Pennie; Fileman, Elaine; Halsband, Claudia; Goodhead, Rhys; Moger, Julian, Galloway, Tamara S. (2013): Microplastic Ingestion by Zooplankton. In: *Environmental science & technology*, volume 47, S. 6646 – 6655. DOI: 10.1021/es400663f

Crawley, Michael J. (2013): The R Book. ISBN: 978-0-470-97392-9

Dris, Rachid; Imhof, Hannes; Sanchez, Wilfried; Gasperi, Johnny; Galgani, François; Tassin, Bruno; Laforsch, Christian (2015): Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-)plastic particles. In: *Environmental Chemistry*, volume 12(5), S. 539 – 550. DOI: 10.1071/EN14172

Demtröder, W. (1996): *Experimentalphysik 3*. ISBN: 978-3-662-07154-0

Eisentraut, Paul; Dümichen, Erik; Goedecke, Caroline; Braun, Ulrike (2019): Mikroplastik-Bestimmung mit TED-GC-MS. In: BMBF-Vorhaben Mikroplastik im Wasserkreislauf (MiWa), Abschlusskonferenz 10.09.2019, Karlsruhe.

Elias, Hans-Georg (2003): *An Introduction to Plastics*. ISBN: 978-3-527-29602-6

Fath, Andreas (2019): *Mikroplastik kompakt*. DOI: 10.1007/978-3-658-25734-7

Frias, J.P.G.L.; Otero, V.; Sobral, P. (2014): Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal waters. In: *Marine Environmental Research*, volume 95, S. 89 – 95. DOI: 10.1016/j.marenvres.2014.01.001

Geyer, Roland; Jambeck, Jenna R.; Lavender Law, Kara (2017): Production, use, and fate of all plastics ever made. In: *Science Advances*, vol. 3, no. 7, e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782

Grummt, Tamara; Kuckelkorn, Jochen; Strobel, Claudia (2019): Wirkungen von Mikroplastik aus humantoxikologischer Sicht in Bezug zu Trinkwasser. In: BMBF-Vorhaben Mikroplastik im Wasserkreislauf (MiWa), Abschlusskonferenz 10.09.2019, Karlsruhe.

Heß, Maren; Diehl, Peter; Mayer, Jens; Rahm, Harald; Reifenhäuser, Werner; Stark, Jochen; Schwaiger, Julia (2018): Mikroplastik in Binnengewässern Süd- und Westdeutschlands (Bundesländerübergreifende Untersuchungen in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz).

Hidalgo-Ruz, Valeria; Thiel, Martin (2015): The Contribution of citizen Scientists to the Monitoring of Marine Litter. In: *Marine Anthropogenic Litter*. S 429 – 447. DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3

- Hosler, D.; Burkett, S. L.; Tarkanian, M. J. (1999): Prehistoric Polymers: Rubber Processing in Ancient Mesoamerica. In: *Science*, 284(5422), S. 1988 – 1991. DOI: 10.1126/science.284.5422.1988.
- Ivleva, Natalia P.; Anger, Philip M.; von der Esch, Elisabeth; Nießner, Reinhard; Elsner, Martin (2019): Mikroplastik-Analytikmittels Raman-Mikrospektroskopie. In: BMBF-Vorhaben Mikroplastik im Wasserkreislauf (MiWa), Abschlusskonferenz 10.09.2019, Karlsruhe.
- Kane, Ian A.; Clare, Michael A.; Miramontes, Elda; Wogelius, Roy; Rothwell, James J.; Garreau, Peirre; Pohl, Florian (2020): Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation. In: *Science* Vol. 368, Issue 6495, S. 1140 – 1145. DOI: 10.1126/science.aba5899
- Kirstein, I. V.; Kirmizi, S.; Wichels, A.; Gerin-Fernandez, A.; Eler, R.; Löder, M.; Gerdt, G. (2016): Dangerous hitchhikers? Evidence for potentially pathogenic *Vibrio* spp. on microplastic particles. In: *Marine Environmental Research*, 120:1 – 8. DOI: 10.1016/j.marenvres.2016.07.004
- Klößner, Philipp; Rynek, Robby; Wagner, Stephan; Reemtsma, Thorsten (2019): Reifenabrieb-Partikel: Analysenmethode und Nachweis in der Umwelt. In: BMBF-Vorhaben Mikroplastik im Wasserkreislauf (MiWa), Abschlusskonferenz 10.09.2019, Karlsruhe.
- Koelmans, Albert A.; Besseling, Ellen; Shim, Won J. (2015). Nanoplastics in the Aquatic Environment. *Critical Review*. In: *Marine Anthropogenic Litter*. S. 325 – 340. DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3
- Lassen, Carsten; Hansen, Steffen Foss; Magnusson, Kerstin; Hartmann, Nanna B.; Rehne Jensen, Pernille; Nielsen, Torkel Gissel; Brinch, Anna (2015): Microplastics: Occurrence, effects and sources of releases to the environment in Denmark. In: *Environmental project No.1793*, 2015. ISBN: 978-87-93352-80-3
- Li, Jingyi; Liu, Huihui; Chen, Paul (2017): Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. In: *Water Research* 137, S. 362 – 374. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.056
- Liebezeit, Gerd; Dubaish, Fatehi (2012): Microplastics in Beaches of the East Frisian Islands Spiekeroog and Kachelotplate. In: *Bull Environ Contam Toxicol* 89, S. 213 – 217. DOI 10.1007/s00128-012-0642-7
- Löder, Martin G. J.; Gerdt, Gunnar (2015): Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics – A Critical Appraisal. In: *Marine Anthropogenic Litter*. S. 201 – 227. DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3
- Lusher, A. L.; Welden, N. A.; Sobral, P.; Coled, M. (2017): Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. In: *Analytical Methods*, volume 9, S. 1346 – 1360. DOI: 10.1039/c6ay02415g
- Lusher, Amy (2015) Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: *Marine Anthropogenic Litter*. S. 245 – 307. DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3
- Masura, Julie; Baker, Joel; Foster, Gregory; Arthur, Courtney (2015): Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment (Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments). DOI: 10.25607/OBP-604
- McCormick, Amanda; Hoellein, Timothy J.; Mason, Sherri A.; Schlupe, Joseph; Kelly, John J. (2014): Microplastic is an Abundant and Distinct Microbial Habitat in an Urban River. In: *Environmental Science & Technology*, Volume 48, Issue 20, S. 11863 – 11871. DOI: 10.1021/es503610r
- McNeish, R. E.; Kim, L. H.; Barrett, H. A.; Mason, S. A.; Kelly, J. J.; Hoellein, T. J. (2018): Microplastic in riverine fish is connected to species traits. In: *Scientific Reports*, volume 8, Article number: 11639. DOI:10.1038/s41598-018-29980-9
- Oehlmann, Jörg; Schulte-Oehlmann, Ulrike; Kloas, Werner; Jagnytsch, Olga; Lutz, Ilka; Kusk, Kresten O.; Wollenberger, Leah; Santos, Eduarda M.; Paull, Gregory C.; Van Look, Katrien J. W.; Tyler, Charles R. (2009): A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife. In: *Phil. Trans. R. Soc. B* 2009 364, S. 2047-2062. DOI: 10.1098/rstb.2008.0242
- Oladejo, Abiola (2017): Analysis of microplastics and their removal from water. Bachelor's thesis (Bachelor of Engineering; Helsinki Metropolia University of Applied Sciences).
- Pepper, I. L.; Rensing, C.; Gerba, C. P. (2004): Environmental Microbial Properties and Processes. In: *Environmental Monitoring and Characterization*. S. 263 – 280. DOI: 10.1016/B978-012064477-3/50016-3
- Prume, J.; Schömann, E. M.; Chiffard, P., Koch, M. (2019): A methodological protocol to extract microplastics from river sediments (bed, bank and floodplain) In: 16th International Conference on Environmental science & technology.

- Reiss, M.; Zaenker, S. (2008): Quellen in der Rhön -Zustand und Besiedlung besonders schutzwürdiger Lebensräume. In: Jahrbuch Naturschutz in Hessen 12/2008, S.27-29.
- Schür, Christoph; Oehlmann, Jörg; Wagner, Martin (2019): Aufnahme und Effekte von Mikroplastik in aquatischen Invertebraten. In: BMBF-Vorhaben Mikroplastik im Wasserkreislauf (MiWa), Abschlusskonferenz 10.09.2019, Karlsruhe.
- Setälä, Outi; Fleming-Lehtinen, Vivi; Lehtiniemi Maiju (2014): Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. In: *Environmental Pollution*, volume 185, S. 77 – 83. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.10.013
- Song, Young Kyoung; Hong, Sang Hee; Jang, Mi; Han, Gi Myung; Rani, Manviri; Lee, Jongmyoung; Shim, Won Joon (2015): A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples. In: *Marine Pollution Bulletin*, volume 93, Issues 1 – 215, S. 202-209. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.01.015
- Van Cauwenberghe, Lisbeth; Janssen, Colin R. (2014): Microplastics in bivalves cultured for human consumption. In: *Environmental Pollution* 193, S. 65 – 70. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.06.010
- Wagner, Martin; Lambert, Scott (2018): Freshwater Microplastics – Emerging Environmental Contaminants?. In: *The Handbook of Environmental Chemistry*. volume 58. DOI: 10.1007/978-3-319-61615-5
- Warren-Thomas, Eleanor M.; Edwards, David P.; Bebbler, Daniel P.; Chhang, Phourin; Diment, Alex N.; Evans, Tom D.; Lambrick, Frances H.; Maxwell, James F.; Nut, Menghor; O’Kelly, Hannah J.; Theilade, Ida; Dolman, Paul m. (2018): Protecting tropical forests from the rapid expansion of rubber using carbon payments. In: *Nature Communications* volume 9, Article number: 911. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03287-9>
- Wendt-Potthoff, Katrin; Imhof, Hannes K.; Wagner, Martin; Primpke, Sebastian; Fischer, Dieter; Scholz-Böttcher, Barbara; Laforsch, Christian (2017): Mikroplastik in Binnengewässern. In: *Handbuch Angewandte Limnologie: Grundlagen – Gewässerbelastung – Restaurierung – Aquatische Ökotoxikologie – Bewertung – Gewässerschutz*. S. 1 – 35. DOI: 10.1002/9783527678488.hbal2016003
- Wiig, Øystein; Derocher, Andrew E.; Cronin, Matthew M.; Skaare, Janneche U. (1998): Female pseudohermaphrodite polar bears at Svalbard. In: *Journal of Wildlife Diseases*, 34(4), S. 792-796. DOI: 10.7589/0090-3558-34.4.792

7. Anhang

1. Bericht Wessling GmbH; CAL-26412-19 (26 Seiten)
2. Civic Laboratory for Environmental Action Research (CLEAR):
„Spotter's Guide to Plastic Pollution“