

Aus dem
Veterinärwissenschaftlichen Department
der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Lehrstuhl für Tierernährung und Diätetik

Arbeit angefertigt unter der Leitung von
Prof. Dr. W. A. Rambeck

**Untersuchungen zum Iodgehalt in Süßwasserfischen.
Feldfütterungsversuch mit der maximal zulässigen
Menge an Iod im Fischfutter**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der tiermedizinischen Doktorwürde
der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Stefanie Daub

aus Tübingen

München 2009

Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Braun

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Rambeck

Korreferent: Prof.-Dr. El-Matbouli

Tag der Promotion: 6. Februar 2009

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Symbole	x
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Literaturübersicht	3
2.1 Das Spurenelement Iod	3
2.2 Der Iodkreislauf	4
2.3 Entstehung von Iodmangelregionen	5
2.4 Iodmetabolismus	7
2.4.1 Iodaufnahme	7
2.4.2 Iodverteilung	8
2.4.3 Iodausscheidung	9
2.5 Die Schilddrüse	10
2.5.1 Hormonsynthese	11
2.5.2 Regulation der Schilddrüsenhormone	12
2.5.3 Funktion der Schilddrüsenhormone	13
2.6 Schilddrüse beim Fisch	14
2.7 Iodmangel	15
2.7.1 Struma	17
2.7.2 Hypothyreose	18
2.7.3 Hyperthyreose	20
2.7.4 Neoplasien	21

2.8	Exzessive Iodzufuhr	22
2.9	Strategien zur Iodmangelprophylaxe	24
2.9.1	Iodierung von Speisesalz	24
2.9.2	Iod als Medikament	26
2.9.3	Iodanreicherung von Futtermitteln und Iodgehalt von Lebens- mitteln tierischer Herkunft	27
2.9.3.1	Milch und Milchprodukte	28
2.9.3.2	Eier	30
2.9.3.3	Fleisch	32
2.9.3.4	Fisch	33
2.9.4	Gefahren durch iodangereicherte Lebensmittel	36
2.10	Iodbedarf	38
2.11	Iodversorgung, aktueller Status	40
3	Material und Methoden	45
3.1	Feldfütterungsversuch mit iodsupplementiertem Futter bei Süßwasser- fischen	45
3.1.1	Versuchsaufbau	45
3.1.2	Versuchstiere	46
3.1.3	Tierhaltung	46
3.1.4	Futter	47
3.1.5	Schlachtungen	48
3.2	Iodverteilung innerhalb der Fischfilets	49
3.3	Räucherversuch	50
3.4	Humanernährungsversuch	51
3.5	Iodanalytik	52
3.5.1	Iodkonzentration im Futter und in den Fischen	54
3.5.2	Iodkonzentration im Urin	61
3.6	Creatininbestimmung	65

3.7	Weender-Analyse des Futters	66
3.7.1	Trockensubstanz	66
3.7.2	Rohfaser	66
3.7.3	Rohasche	68
3.7.4	Rohprotein	68
3.7.5	Rohfett	69
3.8	Statistische Methoden	70
3.8.1	Verlaufsuntersuchungen innerhalb einer Gruppe	70
3.8.2	Vergleichsuntersuchungen zwischen verschiedenen Gruppen	71
4	Ergebnisse	72
4.1	Schlachtgewichte	72
4.2	Filetgewichte	74
4.3	Prozentualer Gewichtsanteil der verschiedenen Kompartimente	75
4.4	Weender Analyse der Fischfutter	78
4.5	Iodkonzentration in den Fischfuttern	78
4.6	Iodkonzentration in den Fischen	79
4.6.1	Iodkonzentrationen der Filets	79
4.6.1.1	Filets der wilden Bachforellen	79
4.6.1.2	Filets aus Schlachtung 1	81
4.6.1.3	Filets aus Schlachtung 2	83
4.6.2	Iodkonzentrationen in den verschiedenen Kompartimenten	84
4.6.2.1	Haut	85
4.6.2.2	Innereien	85
4.6.2.3	Restkörper	85
4.6.2.4	Kiemen	85
4.6.2.5	Gonaden	86

4.6.3	Absolute Iodmenge und prozentuale Iodverteilung der Kompartimente	86
4.6.3.1	Absolute Iodmengen	88
4.6.3.2	Prozentuale Iodverteilung	88
4.7	Räucherversuch	89
4.7.1	Iodkonzentration in den geräucherten Filets	91
4.7.2	Iodkonzentration in der Haut der Räucherfische	92
4.7.3	Iodkonzentration in den Restkörpern der Räucherfische	92
4.8	Humanernährungsversuch	94
4.8.1	Mittlere Iodausscheidung über den Urin während des Humanernährungsversuchs	95
4.8.2	Gesamte Iodausscheidung über den Urin während des Humanernährungsversuchs	96
5	Diskussion	98
5.1	Feldfütterungsversuch zur Iodanreicherung in Süßwasserfischen	98
5.2	Schlacht- und Filetgewichte	99
5.3	Iodkonzentration in den Fischfuttern	101
5.4	Iodkonzentration in den Fischen	102
5.4.1	Iodkonzentration in den Filets	103
5.4.2	Iodverteilung innerhalb der Fische	106
5.4.2.1	Haut	106
5.4.2.2	Innereien	107
5.4.2.3	Kiemen	108
5.4.2.4	Restkörper	109
5.4.2.5	Gonaden	109

5.5	Räucherversuch	115
5.5.1	Iodkonzentrationen der Filets	115
5.5.2	Iodkonzentrationen der Haut	117
5.5.3	Iodkonzentrationen der Restkörper	117
5.6	Humanernährungsversuch	119
6	Zusammenfassung	121
7	Summary	123
A	Anhang	125
	Literaturverzeichnis	128
	Tabellenverzeichnis	139
	Abbildungsverzeichnis	141
	Danksagung	142

Abkürzungen und Symbole

Symbole

\bar{x}	Mittelwert
μg	Mikrogramm
$\pm\sigma$	Standardabweichung
$^{\circ}C$	Temperatur in Grad Celsius
$p < 0,05$	Irrtumswahrscheinlichkeit unter 5%; es liegt ein signifikanter Unterschied vor
$p < 0,001$	Irrtumswahrscheinlichkeit unter 0,1%; es liegt ein höchst signifikanter Unterschied vor
$p < 0,01$	Irrtumswahrscheinlichkeit unter 1%; es liegt ein hoch signifikanter Unterschied vor
%	Prozent

Abkürzungen

As_2O_3	Arsenoxid
As	Arsen
AUC	Area under the curve; Fläche unter der Kurve
BfR	Bundesministerium für Risikobewertung
BgVV	Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin

Ce	Cer
DGE	Deutsche Gesellschaft für Ernährung
DIT	Diiodtyrosin
EFSA	European Food Safety Authority
fT_3	freies 3,5,3'-Triiodthyronin
fT_4	freies 3,5,3',5'-Tetraiodthyronin
FS	Frischsubstanz
g	Gramm
H^+	Wasserstoffion
H_2O	Wasser
H_2SO_4	Schwefelsäure
HCl	Salzsäure
$H_8N_2O_8S_2$	Ammoniumpersulfat
I^-	Iodid
I_2	elementares Iod
ICCIDD	International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders
IF	Iodfische
iSL	iodhaltige Salzlake
KIO_3	Kaliumiodat
KF	Kontrollfische
kg	Kilogramm
KiGGS-Studie	Studie zur Gesundheit von Kindern und Jugendlichen in Deutschland. Durchgeführt vom Robert Koch Institut. Gefördert vom Bundesministerium für Gesundheit, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
KOH	Kaliumhydroxid; Kalilauge
konz.	konzentriert
l	Liter

m	Meter
mg	Milligramm
min.	Minute
MIT	Monoiodtyrosin
ml	Milliliter
mm	Millimeter
<i>n</i>	Anzahl
NaOH	Natriumhydroxid
ng	Nanogramm
NIS	Natrium-Iodid-Symporter
nm	Nanometer
nSL	normale Salzlake
NVS II	Nationale Verzehrs Studie II
<i>rT₃</i>	reverses 3,5',3'-Triiodthyronin
S1	erste Schlachtung
S2	zweite Schlachtung
<i>T₃</i>	3,5,3'-Triiodthyronin
<i>T₄</i>	3,5,3',5'-Tetraiodthyronin
TM	Trockenmasse
TRH	Thyreotropin-Releasing-Hormon
TS	Trockensubstanz
TSH	Thyreotropin; Thyreoidea-stimulierendes Hormon
u.a.	unter anderem
UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund; Kinderhilfswerk der Vereinten Nationen
vs.	versus; gegen
WHO	Weltgesundheitsorganisation
ZnSO ₄	Zinksulfat

Einleitung und Aufgabenstellung

Weltweit hatten im Jahr 2004 zwei Milliarden Menschen nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) eine unzureichende Iodzufuhr.

Iod ist ein lebensnotwendiges Spurenelement für Mensch und Tier, das für die Synthese von Schilddrüsenhormonen benötigt wird. Diese spielen bei einer Vielzahl von Stoffwechselprozessen eine wichtige Rolle. Folgen von mildem Iodmangel, die mit einer verminderten Hirnleistung und -funktion einhergehen, haben häufig unterschätzte negative sozioökonomische Auswirkungen (Andersson et al., 2007; Großklaus, 2008). Um den Körper ausreichend mit Iod zu versorgen und eventuell vorhandene Mangelsituationen ausgleichen zu können, muss Iod ständig über die Nahrung aufgenommen werden.

Vor dem Hintergrund, dass Deutschland lange Zeit zu den Ländern mit einer unzureichenden Iodversorgung gehörte, wurden enorme Anstrengungen unternommen, um eine bessere Iodversorgung der Bevölkerung zu erreichen. Besonders die breite Akzeptanz und Verwendung von iodiertem Speisesalz, sowie die Produktion von iodreicheren Lebensmitteln haben dazu beigetragen, dass sich die Iodversorgung hierzulande in den letzten 20 Jahren deutlich verbessert hat.

Nach aktuellen Ergebnissen der „Studie zur Gesundheit von Kindern und Jugendlichen (KiGGS-Studie)“ haben in Deutschland von über 17.000 Kindern und Jugendlichen 60% eine im unteren optimalen Bereich liegende Iodausscheidung. Zusätzlich

weisen 40% eine unzureichende Iodversorgung auf, von denen 17% sogar als moderater Iodmangel eingestuft werden können (Thamm, 2007).

Nur wenige Lebensmittel, wie etwa Meeresfische, enthalten natürlicherweise hohe Iodkonzentrationen, die bei regelmäßiger Aufnahme geeignet sind eine ausreichende Iodversorgung im Menschen sicher zu stellen. So empfiehlt die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) zweimal pro Woche Meeresfisch zu verzehren. Besonders in küstenfernen Regionen werden, wenn überhaupt, vermehrt Süßwasserfische verzehrt, deren Iodgehalte deutlich niedriger sind. Diese leisten dadurch keinen wesentlichen Beitrag zu einer ausreichenden Iodversorgung.

In den vergangenen Jahren wurde in mehreren Fütterungsversuchen durch den Zusatz verschiedener Meeresalgen erfolgreich die Iodkonzentration in Süßwasserfischen erhöht. Da Algen in der Lage sind, toxische Stoffe wie etwa Schwermetalle und Benzopyren aus dem Meerwasser anzureichern und ihr Iodgehalt teilweise enormen Schwankungen unterliegt, sollte nun ein Versuch mit einem Fischfutter, das mit anorganischem Iod angereichert war, durchgeführt werden.

In der vorliegenden Arbeit sollte überprüft werden, inwieweit unter Praxisbedingungen durch den maximal zulässigen Gehalt von Calciumiodat im Fischfutter, die Iodgehalte in verschiedenen Süßwasserfischarten erhöht werden können, um ein wertvolleres Nahrungsmittel für den Menschen zu erzeugen. Hierfür wurde in Zusammenarbeit mit zwei privaten Fischzüchtern und dem Institut für Fischerei der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft ein sechsmonatiger Feldfütterungsversuch durchgeführt.

Weiter sollte der Iodgehalt von freilebenden Wildfischen mit demjenigen von den Tieren aus den Aquakulturen verglichen werden. Außerdem sollte untersucht werden, wie das Iod innerhalb der Fischkörper verteilt ist.

Eine beliebte Art der Veredelung von Fischen ist das Räuchern. Hierbei sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Verwendung einer iodhaltigen Salzlake vor dem Räucherungsprozess auf den Iodgehalt hat. In einem Humanernährungsversuch sollte zusätzlich eine Antwort auf die Frage gefunden werden, ob durch den Verzehr der geräucherten Fische eine bessere Iodversorgung im Menschen erzielt werden kann und welchen Einfluss dabei die Fütterung, sowie das Einlegen der Fische in unterschiedliche Salzlaken hat.

Literaturübersicht

2.1 Das Spurenelement Iod

Im Jahr 1811 wurde das Spurenelement Iod von dem französischen Salpetersieder Bernard Courtois erstmals in einer Braunalge entdeckt. Die Asche der Braunalge wurde für die Schießpulverherstellung verwendet. Während Courtois „Kelppfannen“ mit heißer schwefeliger Säure reinigte, beobachtete er die Entwicklung violetter Dämpfe, die an den kühleren Teilen der Pfanne wieder auskristallisierten (Anke, 2007). Courtois entnahm von diesem Material Proben und übergab sie an Wissenschaftler. Die Chemiker Sir Humphry Davy und Joseph Louis Gay-Lussac identifizierten in jenen Proben das neue Element. Aufgrund der violetten Dämpfe wurde es von Gay-Lussac im Jahre 1814 nach dem griechischen Wort „iode“ (violett gefärbt) benannt. Iod besitzt die Fähigkeit zu sublimieren, was bedeutet, dass es direkt aus dem festen in den gasförmigen Zustand übergehen kann und umgekehrt (Resublimation). Jenes Phänomen, das Courtois beobachtet hatte.

In festem Zustand bildet Iod dunkelglänzende, rhombisch-schuppenförmig angeordnete Kristalle. In der Natur kommt das Spurenelement in verschiedenen Mineralien (u.a. Lautarit, Dietzeit, Brügginit), in Böden, dem Meereswasser und Meeresalgen sowie in Schwämmen und dem Chilesalpeter vor.

Im Periodensystem hat Iod die Ordnungszahl 53 und besitzt eine relative Atommasse

von 126,9. Es kommt in den unterschiedlichen Oxidationsstufen, -1,+1,+3,+5 und +7 vor. In allen seinen Aggregatzuständen liegt Iod als I_2 Molekül vor. Es gehört zur Hauptgruppe der Halogene und reagiert mit Metallen zu Salzen.

Die industrielle Iodgewinnung findet größtenteils in Chile (59%) und Japan (29%) statt (Kaiho, 2008). Während in Chile Iod bergmännisch abgebaut wird und als Nebenprodukt der Nitratproduktion anfällt, gewinnt man es in Japan aus der Sole bei der Erdöl- und Gasgewinnung. Die industrielle Verwendung des Iods ist vielfältig, so wird es unter anderem bei der Essigsäureherstellung als Katalysator eingesetzt oder als Stabilisator bei der Nylonherstellung. Als Futterzusatz in Mineralstoffgemischen findet Iod in der Landwirtschaft Verwendung. Des Weiteren kann es zur Wasserdesinfektion eingesetzt werden und in der Fotografie findet man Iod in den Silbersalzen. Als Bestandteil von Farbstoffen (z.B. Erythrosin) ist es in der Lebensmittelindustrie vorhanden. In der Medizin wird Iod in Arzneimitteln als Antiseptikum, Antimykotikum und Röntgenkontrastmittel verwendet.

Die einzig bekannte, jedoch absolut lebensnotwendige physiologische Bedeutung des Iods liegt bei der Bildung der Schilddrüsenhormone 3,5,3'-Triiodthyronin (T_3) und 3,5,3',5'-Tetraiodthyronin (T_4).

2.2 Der Iodkreislauf

Iod ist gut wasserlöslich. Es kommt in Gestein vor, aus welchem es bei Verwitterungsprozessen freigesetzt wird. Ein Teil dieses frei gewordenen Iods wird im Boden und an Kolloide gebunden (Anke, 2007). Der weitaus größte Teil gelangt jedoch mit dem Oberflächenwasser in die Ozeane. Diese bilden große Iodspeicher. Meereswasser hat eine Iodkonzentration von ca. 50-60 μg Iod/l (Hetzl und Maberly, 1986), Süßwasser hingegen durchschnittlich nur 5 μg Iod/l. In den Ozeanen reichert sich das Iod in verschiedenen Algen, Schwämmen, Meerestieren und Sedimenten an.

Das organische Iod der Ozeane stellt die Quelle des atmosphärischen Iods dar (Carpenter, 2003). Durch Photooxidation in der Luft wird das organische Iod zu

den löslichen anorganischen Formen des Iods oxidiert, wovon ein beträchtlicher Teil in die Aerosolphase übergeht und in nasser oder trockener Form wieder auf das Land und Meer zurückkehrt. Der Umfang des jährlichen Iodkreislaufs wird nach Hesecker (1999) auf 400.000 t geschätzt.

Der Regen ist in Küstennähe iodreicher als in küstenfernen Regionen und liegt mit 1,8 - 8,5 $\mu\text{g I/l}$ deutlich über dem Iodgehalt der Luft (circa 0,7 $\mu\text{g I/m}^3$) (Hetzl und Maberly, 1986). Auch im Trinkwasser nimmt der Iodgehalt mit zunehmender Entfernung vom Meer ab. So konnte Anke et al. (1993) zeigen, dass in Deutschland in der Nähe von Nord- und Ostsee das Trinkwasser einen Iodgehalt von 9 $\mu\text{g/l}$ aufweist, im Alpen und Bodenseeraum fällt er dagegen auf 1 $\mu\text{g/l}$ ab.

Bodenbakterien scheinen eine wichtige Rolle beim globalen Iodtransfer zu spielen. Sie methylieren Iod in den Böden zu Methyljodid (CH_3I), welches sich verflüchtigt und in die Atmosphäre aufgenommen wird (Amachi et al., 2003). Durch den Humusgehalt der Böden wird ihre Iodbindungskapazität bestimmt. So können humusreiche Böden bis zu 100 mg Iod/kg speichern. Mitteleuropäische Böden weisen eine Iodkonzentration zwischen 0,5-10 mg Iod/kg TM (Anke, 2007) auf. Der Iodgehalt der Flora wird unter anderem durch ihren Standort und den Iodtransfer über die Luft und den Regen bestimmt. Anke (2007) konnte zeigen, dass die Vegetation in alluvialen Auen die höchste Iodkonzentration aufweist und auch hier eine Abnahme des Iodgehaltes mit zunehmender Entfernung zum Meer beobachtet werden kann (z.B. Ackerrotklee 10-50 km zum Meer 272 $\mu\text{g/kg TM}$, 201-320 km zum Meer 132 $\mu\text{g/kg TM}$).

2.3 Entstehung von Iodmangelregionen

Schon in den ersten Stadien der Erdgeschichte hat sich nach Merke (1965) das Iod, ähnlich wie die anderen Halogenide Chlor und Brom, in den Ozeanen konzentriert. Seit dieser Zeit gab es auf der Erde vier Eiszeiten, die jeweils etwa 100.000 Jahre andauerten. In der, im Verhältnis zum Erdalter, relativ kurzen Zeitspanne von etwa eine Million Jahre, erfolgte eine große Umgestaltung der Erdoberfläche. Vor dieser

Zeit war das Iod noch relativ gleichmäßig auf die Kontinente verteilt.

Insbesondere die letzte Eiszeit (Würmeiszeit) war an der Entstehung der heutigen Iodmangelregionen maßgeblich beteiligt. Während dieser Zeit wurde der iodreiche Boden bzw. Humus mit den gletschertransportierten Schuttmassen fortgerissen und zusätzlich während des Abtauens, der mehrere hundert bis tausend Meter dicken Eisschichten, ausgewaschen. Das Iod wurde den Ozeanen zugeführt und es entstanden Gebiete, in denen die Böden sehr unterschiedliche Iodgehalte aufweisen, abhängig davon ob diese vergletschert oder nicht von Eis bedeckt waren. Nach jeder Eiszeit wurde den Böden über die Luft bzw. den Regen erneut Iod zugeführt, so dass ihr Iodgehalt wieder anstieg. Jedoch dauert es mehrere zehn- bis hunderttausend Jahre bis das Fließgleichgewicht des oben beschriebenen Kreislaufes wieder hergestellt ist. Die Tatsache, dass das Abtauen der Gletscher aus der Würmeiszeit erst etwa 10.000 bis 20.000 Jahre zurück liegt, und dass die Iodanreicherung der Böden ein sehr langsamer Prozess ist, erklärt, dass wir uns zurzeit erst am Anfang dieses Prozesses befinden, weshalb in vielen Regionen unterschiedliche Grade des Iodmangels existieren.

Schwere Regenfälle in steilen Bergregionen führten ebenfalls zur Entstehung von Iodmangelgebieten. Auch durch zeitlich kurz aufeinanderfolgende Überschwemmungen, wie beispielsweise in der Gangesregion, werden Iodmangelgebiete aufrecht erhalten. Zu den Gebieten mit Iodmangel werden im Allgemeinen hohe Gebirgsregionen (Alpen, Anden, Himalaya und deren Ausläufer), ein Großteil Europas, Teile Afrikas und Asiens, sowie Australien gezählt.

In Abbildung 2.1 auf der nächsten Seite ist der Grad der Iodversorgungslage weltweit (2004), basierend auf der mittleren Iodausscheidung im Urin, nach der WHO zu sehen.

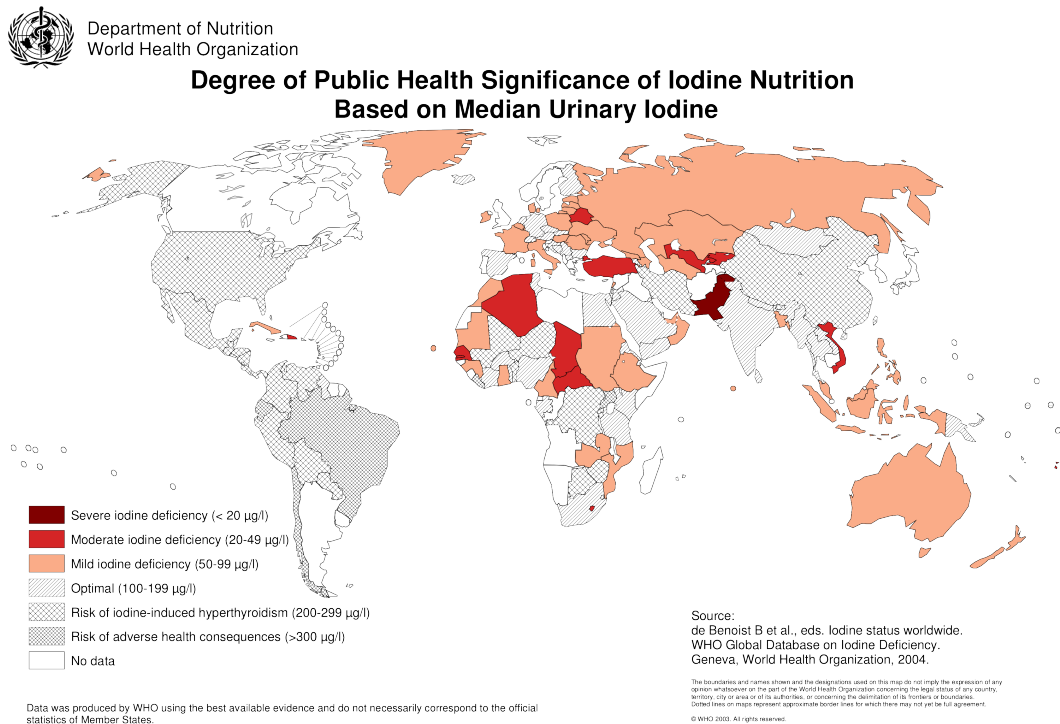


Abbildung 2.1: Bedeutung der weltweiten Iodversorgungslage, basierend auf der mittleren Iodausscheidung im Urin, modifiziert nach de Benoist et al. (2004)

2.4 Iodmetabolismus

2.4.1 Iodaufnahme

Durch pflanzliche und tierische Nahrung, Trinkwasser und iodiertes Speisesalz wird dem menschlichen Körper Iod zugeführt. In den Nahrungsmitteln liegt es meist in anorganischer Form als Iodid vor. Es wird im gesamten Gastrointestinaltrakt absorbiert, wobei die Hauptmenge im Dünndarm aufgenommen wird. Nach Anke (2007) beträgt die Absorptionsrate des mit der Nahrung aufgenommenen Iodids nahezu 100%. Wird Iod in Form von Iodat aufgenommen, so wird es zunächst durch nichtenzymatische Reaktionen zu Iodid reduziert, um dann in dieser Form aufgenommen zu werden (Bürgi et al., 2001).

Durch andere Nahrungsbestandteile wird die Absorption von anorganischem Iod nicht beeinträchtigt. Nach Jahreis et al. (2007) hat proteingebundenes Iod eine hohe Bioverfügbarkeit, die bei Milch und Milchprodukten etwa 90% beträgt. Lange

Zeit wurde angenommen, dass proteingebundenes Iod vom Organismus nur zu 40-70% aufgenommen wird. Auch über die Haut, Schleimhäute und die Lunge kann Iod aufgenommen werden.

Über die Blutbahn erreicht das Iod die Schilddrüse. Hier wird es an der basolateralen Membran der Schilddrüsenfollikelzellen aktiv über die Natrium-Iodid-Symporter (NIS) in die Thyreozyten aufgenommen. Die Aufnahme erfolgt gegen einen 20-40 fachen Gradienten. Dieser Transport ist spezifisch, sättigbar und kompetitiv hemmbar (Voigt, 2003).

Da NIS auch in anderen Geweben, wie etwa der Milchdrüse, den Ovarfollikeln, sowie der Magenschleimhaut und der Speicheldrüse, vorkommen, sind diese Gewebe auch in der Lage Iodid anzureichern. Als endogene Iodquellen stehen Speichel, Galle, Pankreassekrete und Abbauprodukte der Schilddrüsenhormone zur Verfügung.

Einige Lebensmittel, wie etwa verschiedene Kohllarten, Maniok, Bohnen, Erdnüsse, Süßkartoffeln oder Hirse enthalten Glucosinolate, bei deren Abbau Thiocyanat entsteht. Dieses kann die Iodidaufnahme in der Schilddrüse kompetitiv hemmen. Auch in Zigarettenrauch entsteht beim Abbau von Cyanid Thiocyanat. Thiooxazolidone hemmen die Iodierung des Tyrosins, sie sind z.B. in Kohlrüben enthalten. Sie werden beim Kochen allerdings zerstört, so dass ihre Aufnahme in der menschlichen Ernährung eine untergeordnete Rolle spielt. Hohe Nitratgehalte in Nahrungsmitteln oder Trinkwasser können ebenfalls die Iodidaufnahme in der Schilddrüse und im Gastrointestinaltrakt hemmen.

2.4.2 Iodverteilung

Der Serumspiegel von resorbiertem, anorganischen Iod liegt laut dem Bundesministerium für Risikobewertung (BfR) normalerweise zwischen 0,1-0,5 $\mu\text{g}/\text{dl}$ (BfR, 2004b). Von der Schilddrüse wird der größte Teil des absorbierten Iods abgefangen, verstoffwechselt und durch die Bindung an Tyrosin zu organischem Iod umgewandelt. Täglich sezerniert diese Drüse etwa 80 μg Iod, das in den Schilddrüsenhormonen T_4 und T_3 enthalten ist. Im Blut liegen beide Hormone größtenteils an Transportproteine ge-

bunden vor. Im Extrazellulärraum befindet sich organisches, nichthormonales Iod im iodierten Thyreoglobulin, Monoiodtyrosin und Diiodtyrosin, sowie das an Plasmaproteine gebundene T_4 und T_3 .

Der Körper eines erwachsenen Menschen enthält 15-20 mg Iod, wovon 70-80% in der Schilddrüse lokalisiert sind. Der weitaus geringere Prozentsatz ist in Muskulatur, Haut, Knochen und sonstigen Geweben vorhanden. Die Iodkonzentration des Speichels liegt nach Brown-Grant (1961) 30 bis 40 mal über der Plasmaiodkonzentration. Während des Follikelwachstums kommt Iod reichlich im Ovar vor, so konnte Brown-Grant (1961) in Rinderovarien einen Iodgehalt von $970 \mu\text{g}/100\text{g FS}$ finden. Während der Trächtigkeit nahm die Iodkonzentration ab, auch konnte er kein Iod im Corpus Luteum finden. Auch über Iod in Ovarien von Fröschen, Fischen sowie im Eigelb von Hühnereiern wird berichtet. Laktierende Wirbeltiere scheiden mit der Milch große Mengen Iod aus.

2.4.3 Iodausscheidung

Die Exkretion des Iods erfolgt hauptsächlich über die Nieren. Nach Dunn (1998) werden rund 90% des alimentär aufgenommen Iods mit dem Urin ausgeschieden. Da kein Schwellenwert für die renale Ausscheidung existiert, erfolgt die Iodausscheidung unabhängig vom Versorgungszustand. Die Iodurinausscheidung im 24-Stunden-Urin ist nach Heseke (1999) ein guter Indikator um die Iodversorgung der Bevölkerung abzuschätzen. Die Iodverluste über Schweiß und Speichel sind gering.

In der Leber erfolgt der überwiegende Abbau der Schilddrüsenhormone. Das dabei frei werdende Iod wird größtenteils dem Plasma zugeführt und steht somit einer neuen Synthese zur Verfügung. Ein Teil der Schilddrüsenmetabolite wird mit der Galle ausgeschieden und teilweise im Darm wieder rückresorbiert. Die fäkale Iodausscheidung beträgt etwa $20 \mu\text{g}$ pro Tag (BfR, 2004b), wobei ein Teil aus den nicht rückresorbierten Schilddrüsenmetaboliten stammt, der andere aus der Nahrung.

Die Iodausscheidung steigt während der Schwangerschaft infolge erhöhter Nierendurchblutung und damit verbundener erhöhter renaler Exkretion. Beim Stillen wer-

den bis zu 51% des Iods über die Milch ausgeschieden (Grimminger, 2005). Mit zunehmender Laktationsdauer nimmt der Iodgehalt der Milch um etwa ein Viertel des Ausgangswertes ab (Anke, 2007). Auch bei renaler Proteinurie und Durchfall muss mit gesteigerten Iodverlusten gerechnet werden.

2.5 Die Schilddrüse

Die menschliche Schilddrüse besteht aus zwei Seitenlappen, die über eine schmale Parenchymsbrücke miteinander verbunden sind. Sie ist die größte endokrine Drüse im Körper und wird von einer bindegewebigen Kapsel umgeben. Von dieser ziehen gefäß- und nervenhaltige Bindegewebssepten ins Innere und unterteilen die Drüse in mehrere Lobuli. Die Schilddrüse liegt unterhalb des Schildknorpels, wobei die beiden Lappen seitlich der Trachea aufliegen und mit dieser bindegewebig in Verbindung stehen. Die Struktur- und Funktionseinheiten werden von den Schilddrüsenfollikeln und den calcitoninbildenden C-Zellen gebildet.

Die Wände der Follikelzellen bestehen aus Thyreozyten, die ein einschichtiges Epithel bilden, das einer Basalmembran aufsitzt. Abhängig vom Funktionszustand können sich die Gestalt des Follikelepithels, sowie die Form und Größe der Follikel ändern. Die einzelnen Follikel sind von einem dichten Kapillarnetz (Blut- und Lymphkapillaren) und von Nervenfasern umgeben. Das Follikellumen besteht aus einer glasigen, gelatinösen Masse, die als Kolloid bezeichnet wird und die Vorstufe der Schilddrüsenhormone, das Thyreoglobulin, enthält. Mit dem Hormonvorrat des Kolloids kann ein gesunder Mensch etwa drei Monate lang versorgt werden. Das Gewicht einer normalen Schilddrüse beträgt beim Erwachsenen zwischen 15 und 30 g, ihr physiologisches Volumen liegt zwischen 15 und 25 ml.

2.5.1 Hormonsynthese

In den Schilddrüsenzellen wird zunächst das Speicherhormon Thyreoglobulin gebildet und in das Follikellumen abgegeben.

An der basolateralen Membran der Thyreozyten wird Iodid aktiv über die Natrium-Iodid-Symporter aufgenommen (Iodination). Es diffundiert durch die Zellen zur apikalen Membran und wird durch Pendrin (Iodidtransporter) in das Kolloid abgegeben (Köhrle und Schmutzler, 2004). Hier erfolgen die Synthese und Speicherung der Schilddrüsenhormone.

Durch die zellwandständige Thyreoperoxidase wird das Iodid zunächst zu elementarem Iod oxidiert um anschließend mit den Tyrosinresten des Thyreoglobulin zu reagieren (Iodisation). Dabei entstehen im Thyreoglobulin das Monoiodtyrosin (MIT) und Diodtyrosin (DIT). Sie sind beide hormonell inaktiv und werden durch die Peroxidase zu den Schilddrüsenhormonen 3,5,3'-Triiodthyronin (T_3) und 3,5,3',5'-Tetraiodthyronin (T_4) gekoppelt. Bei der Kopplung von zwei DIT entsteht T_4 , wird ein DIT mit einem MIT gekoppelt, resultiert T_3 . Thyreoglobuline sind sehr große Glykoproteine, die 90% des Gesamtschilddrüseniods enthalten (Anke, 2007).

Bei Bedarf werden die iodierten Thyreoglobuline von den Thyreozyten durch Endocytose aus dem Kolloid aufgenommen. Durch proteolytische Spaltung werden T_3 und T_4 freigesetzt und in die Blutbahn abgegeben. Das Verhältnis von T_3 zu T_4 liegt etwa bei 1:9. Nach Knepel (2005) werden täglich etwa $90 \mu\text{g } T_4$ und $8 \mu\text{g } T_3$ sezerniert. Das T_3 hat eine wesentlich stärkere Wirkung, die es zudem schneller entfaltet als das T_4 . Im Plasma werden die Hormone zu 99% an die drei Plasmaproteine Thyroxinbindendes Globulin (TBG), Transthyretin (TTR) und Albumin gebunden (Köhrle und Schmutzler, 2004). Der geringste Teil der Hormone liegt in freier Form vor, wobei sie nur in diesem Zustand stoffwechselaktiv sind. Die Affinität des T_4 zu den Trägerproteinen ist etwa zehnmal höher als die von T_3 , wodurch T_3 rascher verfügbar ist.

In praktisch allen Organen wird das T_4 zunächst intrazellulär durch drei selenhaltige Deiodasen zu T_3 oder zu reversem rT_3 deiodiert. Das dabei freiwerdende I^- wird

erneut der Schilddrüse zur Verfügung gestellt. Die höchste Aktivität der Deiodasen findet sich in der Leber und den Nieren (Knepel, 2005). Das reverse rT_3 ist biologisch inaktiv und entsteht durch Deiodierung am nicht Phenolischen Ring des T_4 . Insbesondere bei schweren Erkrankungen oder Erschöpfungszuständen kommt es zu einer vermehrten rT_3 Bildung, um den Körper durch einen reduzierten Stoffwechsel zu schonen.

2.5.2 Regulation der Schilddrüsenhormone

Die Regulation der Schilddrüsenhormone wird durch die neuroendokrine Steuerung der Hypothalamus-Hypophysen-Schilddrüsen-Achse, den extrathyreoidalen Metabolismus der Schilddrüsenhormone und durch die Iodaufnahme und den Iodhaushalt gesteuert.

Der Hypothalamus synthetisiert als übergeordnetes Zentrum das Thyreotropin-Releasing-Hormon (TRH). Dieses löst an der Hypophyse die Sekretion von Thyreotropin (TSH) aus. TSH wirkt an der Schilddrüse. Hier fördert es die Sekretion von T_3 und T_4 und die Iodidaufnahme in die Schilddrüse. Des Weiteren erhöht es die Blutversorgung der Thyreoidea und beeinflusst Wachstum und Metabolismus des Follikel-epithels. Somatostatin hemmt ebenso wie pharmakologisch wirksame Glucocorticoid-Dosen die TSH Ausschüttung.

T_3 und T_4 wirken mit einer negativen Rückkopplung am Hypothalamus und der Hypophyse, wodurch die TRH und TSH Ausschüttung gehemmt werden. Des Weiteren werden die Synthese und Sekretion des TRH durch noradrenerge Verbindungen reguliert, auch Kälteexposition führt zu einer starken TRH Freisetzung.

Ein niedriger Plasmaiodspiegel stimuliert zum einen die Iodresorption aus dem Gastrointestinaltrakt, zum anderen fördert er unabhängig vom TSH die Hormonsynthese in der Schilddrüse. Ein hoher Plasmaiodspiegel dagegen hemmt die Hormonsynthese und die Abspaltung der Hormone aus dem Thyreoglobulin. Dieser Mechanismus, der auf der Iodkonzentration im Blut beruht, wird als Autoregulation der Schilddrüse bezeichnet.

Nach Wolff und Chaikoff (1948) ist ein weiterer Autoregulationsmechanismus im Iodstoffwechsel benannt. Bei sehr hohen Plasmaiodspiegeln wird intrathyreoidal eine so hohe Iodkonzentration erreicht, dass diese zu einer Blockade der Iodisation führt. Das Iod wird zwar noch in die Follikelzellen aufgenommen, jedoch wird es nicht organifiziert und die Schilddrüsenhormonsynthese stoppt. Nach etwa zwei Tagen passt sich die Schilddrüse an weiterhin erhöhte Plasmaiodspiegel an, indem sie die Iodidaufnahme in die Thyreozyten senkt. Dies wird als Escape-Reaktion vom Wolff-Chaikoff-Effekt bezeichnet. Die Ursache liegt in einer verminderten NIS Biosynthese (Köhrle und Schmutzler, 2004). Es kann so verhindert werden, dass durch einen übermäßig langen Synthesestopp der Schilddrüsenhormone eine Hypothyreose entsteht. Bei Störungen des Wolff-Chaikoff-Effekts kann eine iodinduzierte Hyperthyreose hervorgerufen werden. Bleibt das Escape-Phänomen aus, kann dies zu einer Hypothyreose führen.

Der Wolff-Chaikoff Effekt spielt bei potentiellen Reaktorunfällen eine Rolle, da durch die Gabe hoher Ioddosen die Aufnahme von radioaktivem Iod verhindert und so eine radioaktive Belastung der Schilddrüse deutlich reduziert werden kann.

2.5.3 Funktion der Schilddrüsenhormone

Die biologischen Funktionen der Schilddrüsenhormone sind sehr mannigfaltig. Sie wirken (ähnlich wie Steroidhormone) auf zellulärer Ebene. Zunächst werden die Hormone durch die Zellmembran geschleust. Intrazellulär erfolgt dann die Deiodinisierung von T_4 zu T_3 . Anschließend wird das T_3 an ein nukleäres Rezeptorprotein gebunden. Das aktivierte Rezeptorprotein reguliert in vielen Zellen die Transkription und wirkt so auf die Synthese verschiedener Proteine. Folgende biologische Funktionen werden durch die Schilddrüsenhormone beeinflusst:

Wachstum und Entwicklung:

- Knochenwachstum: permissive und synergistische Wirkung mit dem Wachstumshormon
- Lungenreifung: Einfluss auf die Surfactantbildung
- Steigerung der Biosynthese von Somatotropin (STH)
- Reifung und Entwicklung des Nervensystems

Metabolische Wirkungen: Erhöhung des Grundumsatzes durch Erhöhung des Sauerstoffverbrauches in fast allen Geweben, Erhöhung der Körpertemperatur, Stimulation des Sympathikus

Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel: Stimulation aller Schritte im Kohlenhydratstoffwechsel: Absorption im Gastrointestinaltrakt; Glykogenolyse und Gluconeogenese in der Leber; Glucoseoxidation in Leber, Fettgewebe und Muskulatur; permissive Unterstützung der Lipolyse und Förderung der Lipogenese in der Leber.

Interaktion mit Catecholaminen: Permissiver Effekt auf den Sympathikus, insbesondere über die β -Rezeptoren, deren Anzahl insbesondere am Herzen, in der Muskulatur und dem Fettgewebe, sowie an den Lymphozyten erhöht wird.

2.6 Schilddrüse beim Fisch

Die Schilddrüse der Knochenfische hat dieselbe Grundstruktur wie die der Säugetiere. Die Follikelzellen haben eine runde bis ovale Form und besitzen ein kubisches Epithel. Ein ähnlich iodiertes Thyroxin wirkt auf zahlreiche Stoffwechselprozesse im Fischkörper.

Die anatomische Lage der Fischeschilddrüse unterscheidet sich von der Schilddrüse der Säugetiere. Die Schilddrüsenfollikel verteilen sich diffus, wobei diese Verteilung inter- und intraspezifisch erheblich variieren kann (Schlotfeldt, 1985; Roberts, 2001). Sie sind im Bindegewebe des Pharynxbereichs oder bei einigen Arten um das Auge, sowie an der ventralen Aorta, an den Kiemenbogenansätzen, am Herzen, den Leber-venen und dem renalen hämatopoetischen Gewebe verstreut. In Abbildung 2.2 auf der nächsten Seite ist eine schematische Darstellung der Schilddrüsenfollikelverteilung bei Fischen dargestellt. Über Iodmangel, Kropfbildung, Schilddrüsenanomalien und Neoplasien bei Fischen wird berichtet.

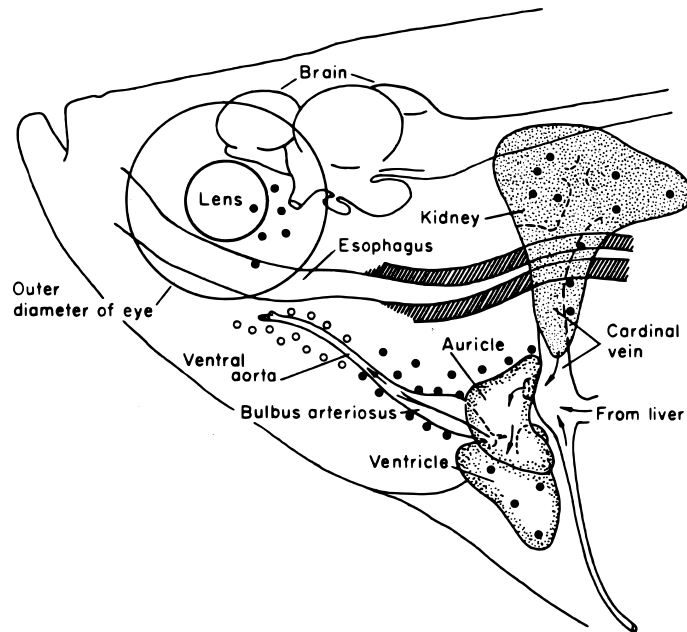


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der \circ normalen und \bullet heterotrophen Verteilung der Schilddrüsenfollikelzellen des Spiegelkarpflings nach Gorbman (1969)

2.7 Iodmangel

Laut Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation hatten im Jahr 2004 weltweit rund 2 Milliarden Menschen (Andersson et al., 2007) eine unzureichende Iodversorgung und damit das Risiko an assoziierten Krankheiten zu erkranken.

Mit dem Begriff der „Iodine Deficiency Diseases“ (IDD) werden die Gesamtheit der durch Iodmangel hervorgerufenen Krankheiten bezeichnet (Hetzel und Dunn, 1989; Delange, 1994). Hierzu zählen neben durch schweren Iodmangel hervorgerufene Iodmangelstruma und endemischen Kretinismus auch die durch milderen Iodmangel hervorgerufenen Erkrankungen, die sich negativ auf die körperliche und geistige Entwicklung von Kindern und Erwachsenen auswirken können. Laut der WHO weisen Populationen, die einem Iodmangel ausgesetzt sind 10-15 IQ-Punkte weniger auf, als Populationen die keinen Iodmangel haben (Andersson et al., 2007). Das Spektrum von Iodmangelkrankheiten ist sehr weitläufig und variiert mit dem Lebensalter. Es ist im Folgenden nach Hesecker (1999) dargestellt:

Spektrum der Iodmangelkrankheiten:

- **Fetus**

- Aborte, Fehlgeburten
- Angeborene Fehlbildungen
- Kretinismus (Zwergwuchs, Myxödem, Taubstummheit, deutlich verzögerte geistige Entwicklung, Oligophrenie)

- **Neugeborene**

- Erhöhte perinatale und kindliche Sterblichkeit
- Angeborene Hypothyreose
- Psychomotorische Störungen
- Taubheit im unteren Frequenzbereich

- **Kinder und Jugendliche**

- Juvenile Struma
- Hypothyreose
- Verminderte mentale Leistungsfähigkeit
- Retardierte körperliche Entwicklung

- **Erwachsene**

- Struma mit oder ohne Adenombildung bzw. Komplikationen
- Hypothyreose
- Eingeschränkte geistige Leistungsfähigkeit
- Infertilität
- Iodinduzierte Hyperthyreose (funktionelle Autonomie)

Iodmangel sowie einen Iodüberschuss kann eine gesunde Schilddrüse in gewissem Rahmen ausgleichen. Hält ein Iodmangel jedoch über längere Zeit an, führt dies zu iodmangelbedingten Erkrankungen der Schilddrüse. Die Häufigkeit und Ausprägung dieser Erkrankungen werden durch den Schweregrad des Iodmangels beeinflusst. Mit zunehmendem Lebensalter steigt die Prävalenz pathologischer Schilddrüsenveränderungen durch Iodmangel und insbesondere durch Iodmangelstruma. Bei rund zwei Dritteln aller Strumaträger, die älter als sechzig Jahre sind, werden eine oder multifokale Schilddrüsenautonomien gefunden.

Allgemeine Symptome eines Iodmangels mit Schilddrüsenunterfunktion sind Veränderungen des Allgemeinbefindens wie etwa Leistungsabfall, Müdigkeit, Kälteempfindlichkeit, erniedrigter Blutdruck, Gewichtszunahme, Appetitlosigkeit, Obstipation, kalte und blasse Haut sowie psychische Unausgewogenheit (BfR, 2004b).

2.7.1 Struma

Die wohl bekannteste Form eines Iodmangels ist die Struma. Es handelt sich hierbei um eine Vergrößerung der gesamten Schilddrüse oder von Teilen des Organs. Weltweit leiden laut einer Schätzung der WHO etwa 740 Millionen Menschen an einer Iodmangelstruma (de Benoist und Delange, 2002).

In Deutschland gibt es laut Papillon Studie, in deren Rahmen im Jahr 2002 an 96.278 Beschäftigten deutscher Unternehmen ein Schilddrüsen-Screening durchgeführt wurde, etwa 20 Millionen Kropfträger (Schumm-Dräger und Feldkamp, 2007). 33% der untersuchten Teilnehmer hatten einen abnormalen Schilddrüsenbefund (Reiners et al., 2004). Jeder vierte Erwachsene hatte Knoten in der Schilddrüse und jeder zweite über 45 Jahre war bereits an diesem Organ erkrankt.

Wird dem Körper über längere Zeit zu wenig Iod zugeführt, kommt es zu einer verminderten Produktion der Schilddrüsenhormone. Die Schilddrüse reagiert auf diesen Zustand mit verschiedenen Anpassungsprozessen, um den euthyreoten Zustand aufrecht zu erhalten. Zunächst maximiert sie den aktiven Iodtransport aus dem Blut in die Follikelzellen. Reicht der Iodgehalt dennoch nicht aus und fällt die T_3 und T_4 Konzentration weiter ab, so kommt es zu einer persistierenden TSH Ausschüttung aus dem Hypophysenvorderlappen.

Durch das TSH wird eine Hypertrophie (Zellvergrößerung durch Zunahme des Zellvolumens) der Schilddrüse ausgelöst. Dieser Vorgang stellt sich nach Hesecker (1999) bei einer Abnahme des physiologischen Iodgehaltes von 700-900 $\mu\text{g/g}$ Schilddrüsen-gewebe auf etwa 200-300 $\mu\text{g/g}$ Gewebe ein.

In der Zellmembran vorkommende Iodlactone haben die Aufgabe die Proliferation von Zellen zu hemmen. Bei Iodmangel werden weniger Iodlactone gebildet, wodurch

lokale Wachstumsfaktoren (z.B. insulin-like-growth factor, epidermal growth factor, transforming growth factor β) ihre Wirkung entfalten können, was zu einer Hyperplasie (Zellvermehrung) des Schilddrüsengewebes führt. Bei ausreichendem Iodangebot verhindern die Iodlactone eine vermehrte Proliferation und damit die Strumaentstehung.

Durch alleinige Iodsubstitution können Iodmangelstrumen effektiv behandelt werden (Gärtner und Dugrillon, 1998). Bei einer Iodkonzentration von unter $150 \mu\text{g/g}$ Schilddrüsengewebe kommt es laut Hesecker (1999) zu einer Schilddrüsenhyperplasie. Die Struma stellt nicht nur ein kosmetisches Problem dar, sondern kann mechanisch bedingte Beschwerden, wie etwa Atem- und Schluckbeschwerden oder gar venöse Stauungen verursachen. Besteht die Struma längere Zeit, so kann es zur Entwicklung von Strukturanomalien kommen, in deren Folge Hypothyreose, sowie bei plötzlich exzessiver Iodzufuhr Hyperthyreosen entstehen können. Auch steigt die Gefahr einer neoplastischen Entartung.

2.7.2 Hypothyreose

Die Hypothyreose ist durch eine zu geringe Produktion der Schilddrüsenhormone gekennzeichnet. Infolge des Hormonmangels kommt es zu einer reduzierten Stoffwechselrate. Eine Schilddrüsenunterfunktion kann sowohl angeboren als auch intrauterin sowie postnatal erworben werden.

Intrauterin entsteht sie durch Iodmangel oder erhöhte Iodaufnahme der Mutter, unter dem Einfluss strumiger Substanzen, sowie immunogen bedingt.

Postnatal erworbene Hypothyreosen können entzündungsbedingt, nach Strahlentherapie, postoperativ, durch extremen Iodmangel, strumige Substanzen, hormonbindende Antikörper sowie durch Schilddrüsentumore verursacht sein.

Je nach Lokalisation des Defektes in der Hypothalamus-Hypophysen-Schilddrüsen-Achse, können folgende Formen der Hypothyreose unterschieden werden:

- **Primäre Hypothyreose:** Die Ursache liegt in der Schilddrüse selbst. Trotz ausreichender TSH Stimulation werden zu wenig Schilddrüsenhormone gebildet. Die autoimmune Hashimoto-Thyreoiditis, eine der häufigsten Ursachen einer erworbenen Hypothyreose, zählt zu dieser Gruppe.
- **Sekundäre Hypothyreose:** Die Hypophyse ist nicht in der Lage ausreichende Mengen an TSH zu bilden, wodurch die Stimulation für die Hormonsynthese der Schilddrüse ungenügend ist.
- **Tertiäre Hypothyreose:** Der Hypothalamus produziert eine unzureichende Menge an TRH, dadurch wird die Hypophyse ungenügend stimuliert.

Die Prävalenz manifester Hypothyreosen liegt mit 0,1-1,5 % (Schumm-Draeger, 2006) niedrig. Nach Schätzungen weisen laut Hoc (2003) 3-16 % der deutschen der Bevölkerung eine subklinische Hypothyreose auf. In der Regel entwickelt sich die manifeste Hypothyreose über einen längeren Zeitraum und geht mit unterschiedlichen, unspezifischen Symptomen wie etwa Müdigkeit, Konzentrationsschwäche, Kälteintoleranz, Obstipation, Depression und Gewichtszunahme einher. Extremer intrauteriner Iodmangel kann beim Fetus zu schweren körperlichen, geistigen und neurologischen Entwicklungsstörungen und zum Kretinismus führen, der die schwerste Komplikation des Iodmangels darstellt. Vor allem Menschen, die in extremen Iodmangelgebieten leben, sind davon betroffen. In Europa ist er nach Angaben der WHO sehr selten geworden (Andersson et al., 2007).

Die häufigste Ursache einer Schilddrüsenunterfunktion im Erwachsenenalter ist nach Schumm-Dräger und Feldkamp (2007) die Autoimmunthyreoiditis vom Typ Hashimoto. Das Vollbild dieser Erkrankung ist durch eine Erhöhung der Antikörper gegen die Thyreoperoxidase, Hypothyreose, klassisch durch eine Vergrößerung des Organs sowie ein echoarmes Ultraschallbild gekennzeichnet.

2.7.3 Hyperthyreose

Eine Hyperthyreose wird durch eine zu hohe Konzentration der Schilddrüsenhormone hervorgerufen. Besteht über einen langen Zeitraum ein Iodmangel, so können sich im hyperplastischen Schilddrüsengewebe autonome Zellgruppen („heiße Knoten“) entwickeln. Diese speichern Iod und produzieren bedarfsunabhängig T_3 und T_4 . Typische Symptome einer Hyperthyreose sind Ruhelosigkeit, Übererregbarkeit, Schlaflosigkeit, vermehrtes Schwitzen, Gewichtsabnahme, Durchfall, Haarausfall und Tachykardie. Schilddrüsenüberfunktionen können bei niedriger Iodversorgung spontan entstehen oder durch eine erhöhte Iodzufuhr bei vorher niedriger Versorgungslage verursacht werden (Pickardt, 1994). Diese iodinduzierten Hyperthyreosen treten vor allem in Bevölkerungen ehemaliger Iodmangelgebiete auf. Saller und Mann (1995) geben an, dass in Deutschland rund 15% aller Hyperthyreosen durch eine Iodkontamination entstehen.

Die Quellen einer vermehrten Iodzufuhr sind insbesondere iodhaltige Röntgenkontrastmittel (5000 mg Iod) und iodhaltige Medikamente (z.B. Amiodaron: 100 mg enthalten 37 mg Iod). Auch können manche Algen- und Seetangprodukte, die sehr viel Iod enthalten (5-11.000 mg/kg TS), eine Überfunktion der Schilddrüse auslösen.

In einigen Ländern wie z.B. Tansania, Simbabwe oder der Demokratischen Republik Kongo stieg die Anzahl der iodinduzierten Hyperthyreosen nach Einführung der Iodsalzprophylaxe stark an. Betroffen hiervon waren vor allem ältere Personen über 40 Jahre. Die Ursache lag in einem mangelnden Monitoring der Qualität des Iodsalzes und einer viel zu hohen Iodsupplementation. Innerhalb sehr kurzer Zeit (1-2 Jahre) kam es zu einer raschen Überschreitung der Medianen Iodurie von $200 \mu\text{g}/\text{l}$, wobei Maximalwerte von $1600 \mu\text{g}/\text{l}$ gemessen wurden (Großklaus, 2007). In Simbabwe beispielsweise stieg die Inzidenzrate der iodinduzierten Hyperthyreosen von 2,8 pro 100.000 Einwohner im Jahr 1991 auf 7,4 pro 100.000 Einwohner im Jahr 1995 (BfR, 2004a). Auch in der ehemaligen DDR wurde nach der Einführung der Iodsalzprophylaxe und Verfütterung iodierter Mineralstoffmischungen, an landwirtschaftliche Nutztiere, ein Anstieg der Hyperthyreoseraten zwischen 1984 und 1989 verzeichnet.

Nach Laurberg et al. (2001) ist ein Anstieg iodinduzierter Hyperthyreosen ein vorübergehender Effekt, langfristig werde die Entstehung autonomer Schilddrüsenknoten gesenkt. Er beschreibt in epidemiologischen Studien, dass in Iodmangelgebieten Hyperthyreosen vorwiegend bei älteren und vermehrt bei weiblichen Personen vorkommen. Die klinischen Symptome werden durch Herzarrhythmien, Osteoporose und Muskelatrophie repräsentiert (Laurberg et al., 2000).

Nach Jahreis et al. (2007) ist mit einer Zunahme der Hyperthyreosen aufgrund der Verwendung von Iodsalz in Deutschland nicht zu rechnen, die Prävalenz medikamentös behandelter Hyperthyreosen liegt bei 0,9% (Frauen) bzw. 0,2% (Männer).

Eine weitere Ursache für die Entstehung von Hyperthyreosen stellt die Immunopathie vom Typ Morbus Basedow dar. Er ist in Ländern mit guter Iodversorgung die häufigste Ursache einer Überfunktion der Schilddrüse. Es handelt sich um eine Autoimmunerkrankung, die familiär gehäuft auftritt und bei Frauen etwa fünf bis sechs mal häufiger als bei Männern vorkommt (Schumm-Dräger und Feldkamp, 2007). Der Ausbruch der Krankheit liegt gehäuft in Zeiten eines hormonellen Umbruchs. Bei dieser Erkrankung werden Autoantikörper gegen die TSH-Rezeptoren gebildet, wodurch eine gesteigerte TSH Sekretion hervorgerufen wird. Diese wiederum bewirkt eine gesteigerte Produktion von T_3 und T_4 und ruft somit eine hyperthyreote Stoffwechselsituation hervor. Als Ursachen werden neben Stress auslösenden Situationen auch Infektionen durch Bakterien (Yersinien) und Viren, sowie eine erhöhte Iodzufuhr insbesondere durch sehr stark iodhaltige Medikamente diskutiert. Die Prävalenz dieser Erkrankung liegt in Deutschland bei 2,5% (Anke, 2007).

2.7.4 Neoplasien

Iodmangel kann für die Entstehung von Knoten in der Schilddrüse verantwortlich sein. Je länger ein Iodmangel besteht, desto häufiger kommt es nach Pfannenstiel (1987) zu zystischen Veränderungen, Verkalkungen und gutartigen Adenomen. Es handelt sich hierbei um „kalte Knoten“, die kein Iod speichern und somit nicht in der Lage sind, Schilddrüsenhormone zu produzieren. In 3 bis 5% der Fälle können sie sich

allerdings bösartig entarten und müssen operativ behandelt werden. Insgesamt gehören Schilddrüsenneoplasien zu den seltenen Tumorerkrankungen. Etwa 1,5/100.000 Einwohner bei Männern und 4,1/100.000 Einwohner bei Frauen sind in Deutschland pro Jahr betroffen (Schumm-Dräger und Feldkamp, 2007). Nach Schätzungen des Robert Koch Instituts erkranken jährlich rund 5.060 Menschen an Schilddrüsenkrebs. Schilddrüsenkarzinome treten zum einen gehäuft in jüngerem, zum anderen in hohem Alter auf. Die Heilungsaussichten sind bei rechtzeitigem Erkennen im Allgemeinen recht gut.

2.8 Exzessive Iodzufuhr

Durch eine übermäßige Iodzufuhr ($>1000 \mu\text{g}/\text{Tag}$) können gesundheitliche Schäden hervorgerufen werden. Je nach Dosis und Empfindlichkeit der betreffenden Personen kann neben einer Hyperthyreose auch eine Hypothyreose ausgelöst werden. Auch können Überempfindlichkeitsreaktionen und Begünstigung von Autoimmunerkrankungen beobachtet werden.

Gesunde Erwachsene mit ausreichendem Iodgehalt der Schilddrüse können normalerweise 1000 bis 2000 μg Iod/Tag ohne Nebenwirkungen tolerieren. Da in der Vergangenheit viele Menschen einem Iodmangel ausgesetzt waren und zum Teil noch immer sind, wurde die sichere Obergrenze für die tägliche Iodaufnahme von der WHO auf 1000 $\mu\text{g}/\text{Tag}$ festgesetzt. In Deutschland hat das Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin (BgVV) und die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) aus Vorsorgegründen empfohlen, täglich nicht mehr als 500 μg Iod zu konsumieren.

Die Auslösung der iodinduzierten Hyperthyreose ist unter 2.7.3 auf Seite 20 beschrieben. Prädisponierende Faktoren sind strukturelle Veränderungen in der Schilddrüse, wie sie oft bei älteren Personen gefunden werden, sowie eine latente oder manifeste Immunopathie vom Typ Morbus Basedow. Durch hohe Iodaufnahmen kann es zur Entstehung einer Schilddrüsenüberfunktion kommen.

Die iodinduzierte Hypothyreose wird überwiegend in Gebieten mit täglich hoher Iodaufnahme gesehen (Saller et al., 1998). Bei chronisch hoher Iodaufnahme von über 1 mg/Tag kommt es zu einer Abnahme der Natrium-Iodid-Symporter und der mRNA der Thyreoperoxidase, wodurch sich eine Unterfunktion der Schilddrüse und eine Struma entwickeln kann (Anke, 2007).

Ein klassisches Gebiet hierfür war die Insel Hokkaido in Japan. In einigen Gebieten hatten 14% der Bevölkerung Kröpfe, die zum Teil sehr groß waren (Laurberg et al., 2001). Traditionell wurden in diesen Gegenden viel Algen und Seetang verzehrt, wodurch die Menschen einer exzessiven Iodzufuhr ausgesetzt waren. Die Iodurinausscheidung betrug im 24-Stundenurin 20.000 μg (Laurberg et al., 2001). Durch Reduktion der alimentären Iodzufuhr bildeten sich die Strumen zurück.

Auch aus China gibt es Berichte über endemische Gebiete mit iodinduzierter Struma. Die exzessive Iodaufnahme erfolgte hier über Trinkwasser, das zum Teil einen Iodgehalt von 462 $\mu\text{g/l}$ hatte (Laurberg et al., 2001).

Ein Versagen der Escape Reaktion nach dem Wolff-Chaikoff-Effekt wird als Ursache für diese Art der Hypothyreose angesehen. Normalerweise stellt die Schilddrüse bei hohen Iodkonzentrationen die Synthese und Ausschüttung von Schilddrüsenhormonen ein. Nach einigen Tagen kommt es jedoch wieder zu einem normalen Schilddrüsenmetabolismus. Bleibt diese Rückkehr zur normalen Schilddrüsenfunktion aus, resultiert daraus eine Unterfunktion des Organs. Es kann zur Entwicklung einer Struma kommen. Die betroffenen Personen haben eine sehr niedrige Iodausscheidung im Urin, das Serumthyroxin liegt unterhalb des Referenzbereiches. Die Entwicklung iodinduzierter Hypothyreosen kann nach Verabreichung iodhaltiger Medikamente und Röntgenkontrastmittel, durch stark iodhaltige Hautdesinfektionsmittel oder Kosmetika, sowie nach dem Verzehr stark iodhaltiger Nahrungsmittel (Algen) beobachtet werden.

Besonders Neugeborene sind für die Entwicklung einer iodinduzierten Schilddrüsenunterfunktion empfindlich, da bei ihnen der Wolff-Chaikoff-Effekt noch nicht ausgebildet ist (BfR, 2004b). Auf die Anwendung von iodhaltigen Hautdesinfektionsmittel sollte daher verzichtet werden.

Durch hohe Iodabsorption können Überempfindlichkeitsreaktionen ausgelöst werden. Die Dermatitis herpetiformis Duhring ist eine Autoimmunerkrankung, die häufig mit glutensensitiver Enteropathie einhergeht und durch Halogene provozierbar ist.

Es können allergische Reaktionen vom Spättyp, die sich als Kontaktekzem manifestieren, ausgelöst werden. Daneben kann es zu Intoleranzen auf iodhaltige Röntgenkontrastmittel und Medikamente kommen. Dabei lagert sich Iod unspezifisch an die Aminosäuren von Körpereiwießen an, wodurch diese als Haptene wirken können. Reutter und Eugster (1985) beschreiben in einem Fallbeispiel, dass eine Frau nach der Anwendung von iodhaltigem Kontrastmittel Symptome wie subfebrile Temperaturerhöhung, Erbrechen, Parotisschwellung, allergische Vaskulitis und oberflächliche Konjunktivitis gezeigt hat.

Die bereits weiter oben erwähnte Basedowsche Erkrankung ist eine Immunerkrankung, wobei die Häufigkeit des Vorkommens nach Anke (2007) von der Iodversorgung beeinflusst zu sein scheint. Laut BfR (2004b) ist bei Menschen mit subklinischer Hashimoto-Thyreoiditis die Empfindlichkeit gegenüber den inhibitorischen Effekten bei einer exzessiven Iodaufnahme gesteigert. Durch 200 μg Iod zusätzlich zur normalen Iodaufnahme kann es zur Entwicklung einer manifesten Hypothyreose kommen.

2.9 Strategien zur Iodmangelprophylaxe

2.9.1 Iodierung von Speisesalz

Zur Beseitigung und Prophylaxe von Iodmangelkrankheiten wird von der WHO, von UNICEF, den Vereinten Nationen und dem ICCIDD (International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders) die Iodierung von Speisesalz als die Methode der Wahl empfohlen. Sowohl ihre Effektivität als auch gesundheitliche Unbedenklichkeit ist durch den Einsatz in über 70 Ländern belegt worden. Es ist eine der besten und sichersten Präventionsmaßnahmen, da Speisesalz ein konstanter Bestandteil der menschlichen Ernährung ist. Zudem beeinflusst die Iodierung weder die Farbe noch den Geschmack oder den Geruch von Salz und die Kosten für iodiertes Speisesalz sind mit 2 bis 9 US Cent pro Person im Jahr gering.

Die Schweiz führte 1922 als erstes Land die Prophylaxe mit Iodsalz ein. Es folgten schon ein Jahr später die USA, dann Schweden (1930), Australien (1947-1953), Finnland und Österreich (1948) sowie die ehemalige Tschechoslowakei (1949) (Lux und Walter, 2005). In Deutschland wurde Iodsalz 1959 als diätetisches Lebensmittel (3-5 mg Iod/kg Salz) verfügbar. Erst im Dezember 1993 wurde durch den Wegfall der Deklarationspflicht ein unkompliziertes Einbringen von iodiertem Speisesalz in die Nahrungskette möglich.

Laut dem Arbeitskreis Iodmangel lag im Jahr 2006 der Anteil von Iodsalz im Haushalt bei rund 82% (Arbeitskreis Iodmangel, 2007), was gegenüber 1975 (5%) (Scriba et al., 2007) eine Steigerung von knapp 77% darstellt. Täglich werden rund 20 μg Iod durch Iodsalzanwendung im Haushalt aufgenommen (Jahreis et al., 2007). Der Anteil von Iodsalz in Großgebinden, einschließlich loser Waren liegt bei 29% und hat seit 2004 (35%) um 6% abgenommen. Die tägliche Iodzufuhr aus Großgebinden beläuft sich auf etwa 35-40 μg Iod (Jahreis et al., 2007; Großklaus, 2007). Um einen nachhaltigen Ausgleich des Iodmangels zu erreichen, wird hier ein Iodsalzanteil, wie von der WHO gefordert, von mindestens 70% angestrebt.

In Deutschland darf iodiertes Speisesalz 15-25 mg Iod/kg Salz enthalten. Üblicherweise enthält Iodsalz 32 mg Kaliumiodat, was einem Iodgehalt von 20 mg Iod pro kg Salz entspricht. Mit einer Salzaufnahme von 5 g können dem Körper somit 100 μg Iod zugeführt werden. Nur 8% der täglichen Salzaufnahme werden jedoch im Haushalt aufgenommen, so dass es kaum möglich ist, durch alleinige Verwendung von iodiertem Salz im Haushalt, die Iodversorgung der Bevölkerung zu decken.

Auch wird im Rahmen präventiver Maßnahmen nur ein mäßiger Kochsalzverbrauch empfohlen und auch Schwangere und Stillende können ihren erhöhten Iodbedarf nicht durch eine erhöhte Kochsalzaufnahme decken. Zudem muss bedacht werden, dass beim Kochen von Nudeln und Gemüse die Hauptmengen des zugesetzten Iods ins Kochwasser übergehen (Gärtner, 2000; Anke, 2007).

Meng und Scriba (2002) geben an, dass 30-40% des täglichen Iodbedarfs über Backwaren gedeckt werden können, wenn diese mit Iodsalz hergestellt werden. Nach dem

Arbeitskreis Jodmangel (2004) kommen mehr als 80% des täglich konsumierten Salzes aus verarbeiteten Produkten.

Dies führt zu der Notwendigkeit, dass der Bevölkerung ein breites Angebot an Lebensmitteln mit Iodsalz zur Verfügung gestellt wird. Besonders die Nahrungsmittelindustrie, Gastronomie und Fast-Food-Ketten können durch einen konsequenten Iodsalzgebrauch dazu beitragen, dass die Iodversorgung zukünftig noch verbessert wird. Dazu ist es allerdings notwendig, dass noch bestehende Handelshindernisse innerhalb der Europäischen Union beseitigt werden. Die Zulassung von Iodsalz in Form von Kaliumiodid und Kaliumiodat in allen Mitgliedsländern ist hierbei ein wichtiger Schritt.

2.9.2 Iod als Medikament

Um besonders vom Iodmangel betroffene Bevölkerungsgruppen effektiv mit Iod zu versorgen, bietet sich die Möglichkeit einer medikamentösen Verabreichung an. Insbesondere solange keine anderen Strategien verwirklicht sind und wenn kein iodiertes Speisesalz erhältlich ist.

Zur Verfügung stehen hierzu neben Iodtabletten auch iodiertes Öl (z.B. Lipiodol von Guerbet, Frankreich), das per os oder intramuskulär verabreicht werden kann. Das so aufgenommene Iod wird im Fettgewebe gespeichert und langsam freigesetzt. Die intramuskuläre Injektion von iodiertem Öl wurde erstmals in Papua-New Guinea eingesetzt. Die üblichen Dosen ab einem Alter von einem Jahr betragen pro Injektion 480 mg Iodid. Bei Bedarf ist eine vierjährige Wiederholung möglich (Bürgi und Helbling, 1996). Die orale Supplementation erfolgt in jährlichen Abständen, dabei werden nach Bürgi und Helbling (1996) Dosierungen von 200-480 mg verabreicht. Besonders bei Schwangeren und Kindern ist diese Art der Supplementation sinnvoll.

Da über die optimale Dosierung noch keine einheitliche Meinung existiert, untersuchte Zimmermann et al. (2000) die Sicherheit und Wirksamkeit einer niedrig dosierten oralen Gabe an Kindern, die eine Struma hatten. In dieser Studie erhielten 104 Kinder im Alter von 6-12 Jahren einmalig 0,4 ml iodiertes Öl, das einen Iodgehalt von 200 mg

hatte. Nach 30 Wochen konnte mittels Ultraschall eine Reduktion des Schilddrüsenvolumens um 35%, nach 50 Wochen um 41% nachgewiesen werden. Die Struma-Rate lag nach 50 Wochen bei 17%. Die durchschnittliche Iodkonzentration im Urin betrug auch nach 50 Wochen $97 \mu\text{g}/\text{l}$, sie war ein ganzes Jahr lang signifikant höher als vor der Verabreichung des Präparats. Bei keinem der Kinder konnte ein Anzeichen einer iodinduzierten Hyper- oder Hypothyreose festgestellt werden.

Neben der Bekämpfung von Iodmangelzuständen kann Iod auch präventiv gegenüber einer weiteren Iodaufnahme, z.B. nach Reaktorunfällen eingesetzt werden. So wurde in Polen nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl in besonders betroffenen Gebieten Kindern eine einmalige Dosis von 15 mg Iodid verabreicht. Bei nur 12 von 3214 Kindern wurde eine vorübergehende TSH Erhöhung festgestellt, die Schilddrüsenhormone lagen im physiologischen Bereich. Es wurden keine ernsthaften Funktionsstörungen der Schilddrüse oder sonstige Nebenwirkungen beobachtet (Gärtner, 2000). Gärtner (2000) gibt weiterhin an, dass Erwachsene einmalig 100-300 mg Iodid aufnehmen müssen um eine Aufnahme von radioaktivem Iod in die Schilddrüse zu verhindern.

Allgemein besteht Einigkeit darüber, dass besonders Schwangere und Stillende aufgrund ihres höheren Iodbedarfs Iod in Form von Iodtabletten zu sich nehmen sollen.

2.9.3 Iodanreicherung von Futtermitteln und Iodgehalt von Lebensmitteln tierischer Herkunft

Eine weitere Strategie um den Iodgehalt der Bevölkerung zu verbessern, ist die Iodanreicherung von Futtermitteln. Durch ein carry over in die tierischen Lebensmittel soll der Iodgehalt in diesen erhöht werden. In den letzten Jahren wurde hierdurch in verschiedenen Lebensmitteln, besonders in Milch und Milchprodukten, sowie in Eiern, der Iodgehalt erfreulicherweise gut verbessert.

Analog zur Humanernährung gibt es von verschiedenen Gesellschaften (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (GfE), National Research Council (NRC, USA)) Empfehlungen für die Iodversorgung von landwirtschaftlichen Nutztieren. Diese schwanken

nach Flachowsky et al. (2006) zwischen 0,15 und 0,8 mg/kg Futterrockensubstanz und liegen deutlich über dem Nettobedarf der Tiere. In Tabelle 2.1 sind einige Empfehlungen exemplarisch dargestellt. Die ESFA (2005) (European Food Safety Authority) gibt den Iodbedarf von Tieren mit 0,1 bis 1,1 mg/kg Futtermittel an.

Innerhalb einer Tierart variiert er in Abhängigkeit von verschiedenen Stoffwechselsituationen wie etwa Wachstum, Fortpflanzung und Laktation und ist des Weiteren von Ernährungsfaktoren (z.B. Goitrogenen) abhängig. Zusammenfassend kann jedoch festgehalten werden, dass die zugelassenen Mengen von Iod in Futtermitteln den physiologischen Bedarf der Tiere um das 3 bis 20-fache übersteigen. In Europa sind, basierend auf der Verordnung (EG) Nr. 1459/2005, folgende Höchstmengen für Iod in Alleinfuttermitteln mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 12% zugelassen:

- **Pferde: 4 mg/kg**
- **Milchkühe und Legehennen: 5 mg/kg**
- **Fische: 20 mg/kg**
- **sonstige Tierarten oder Tierkategorien: 10 mg/kg**

Als Zusatzstoffe dürfen Calciumiodat (Hexahydrat), Calciumiodat (wasserfrei), Natriumiodid und Kaliumiodid eingesetzt werden.

Milch und Eier weisen als Produkte von landwirtschaftlichen Nutztieren die höchsten Iodkonzentrationen auf.

2.9.3.1 Milch und Milchprodukte

Mit rund 37% sind Milch und Milchprodukte (BfR, 2004a) mittlerweile die Hauptquelle der Iodzufuhr. Dabei liegt der Iodgehalt in der Milch zwischen 82-115 $\mu\text{g/l}$ (BfR, 2004a), wenn die Tiere über das Futter ausreichend mit Iod versorgt sind. Ist dies nicht der Fall, so liegt der Iodgehalt von Kuhmilch nach Anke (2007) bei etwa 24 $\mu\text{g/l}$. Bei der Käse- und Quarkherstellung geht ein Teil des Iods mit der Molke verloren, so dass diese Produkte iodärmer als die Milch selbst sind.

In verschiedenen Studien konnte gezeigt werden, dass durch Iodsupplementation des Futters ein höherer Iodgehalt in der Milch erzielt werden kann. Dabei kam es zu keinen Nebenwirkungen bei den Milchkühen oder zu Qualitätseinbußen in der Milch.

Tabelle 2.1: Empfehlungen zur Iodversorgung landwirtschaftlicher Nutztiere von verschiedenen Gesellschaften in [mg/kg] Futtertrockensubstanz nach Flachowsky et al. (2006)

Tierart/Kategorien	GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie)	NRC (National Research Council)
Wiederkäuer		
Milchkühe	0,50	0,50
Mastbullen	0,25	0,50
Schafe	k.A.	0,1-0,8
Ziegen	0,3-0,8	k.A.
Schweine		
Mastschweine	0,15	0,16
Zuchtsauen	0,5-0,6	0,16
Geflügel		
Legehennen	0,50	0,32-0,48
Broiler	0,50	0,35

Kaufmann und Rambeck (1998) konnten an 25 Kühen der Rasse Holstein Friesian, die in dreiwöchigen Intervallen Iodzulagen von 20, 60 und 150 mg/Tag zum normalen Futter erhalten hatten, zeigen, dass der Iodgehalt in der Versuchszeit signifikant anstieg. Es konnten in der Phase der höchsten Zulage Werte über 800 $\mu\text{g/l}$ erzielt werden, der mittlere Gehalt lag bei 480 $\mu\text{g/l}$.

Hornauer (2001) konnte durch den Zusatz von 0,5% und 1% Algen der Art *Laminaria digitata* ins Futter zusätzlich durchschnittliche Iodaufnahmen von 101 bzw. 234 mg Iod erzielen. Der durchschnittliche Iodgehalt der Milch betrug zu Beginn des Versuches etwa 50 $\mu\text{g/l}$ und konnte auf Werte von 945 $\mu\text{g/l}$ bzw. 1800 $\mu\text{g/l}$ angehoben werden.

Jahreis et al. (2007) gibt an, dass der mittlere Iodgehalt aus 34 Kuhmilchproben von Thüringer Milchlieferanten bei 178 $\mu\text{g/l}$ liegt und sich der Iodgehalt in der Kuhmilch während der letzten Jahre deutlich verbessert hat, da die Tiere mittlerweile bedarfs-

gerecht mit Iod versorgt sind. Des Weiteren konnte er zeigen, dass sich der Iodgehalt zwischen konventioneller (169 $\mu\text{g}/\text{l}$) und biologisch (112 $\mu\text{g}/\text{l}$) erzeugter Milch signifikant unterschied.

Aus anderen europäischen Ländern gibt es ebenfalls Berichte über die Steigerung des Milchiodgehalts. So etwa aus Schweden, wo es im Zeitraum von 1975-1995 zu einer Zunahme des Milchiodgehalts um 80% auf jetzt 140 $\mu\text{g}/\text{l}$ gekommen ist. In England konnte in der Zeit von 1991-1999 eine Steigerung von 150 auf 311 $\mu\text{g}/\text{l}$ verzeichnet werden (Flachowsky et al., 2006). In Norwegen wird nach Dahl et al. (2004) die tägliche Iodzufuhr von Erwachsenen und Kindern zu etwa 55% bzw. 70% aus Milch und Milchprodukten gedeckt.

Im Winter ist der Iodgehalt der Milch höher als im Sommer (Lee et al., 1994; Als et al., 2003; Flachowsky et al., 2006), was mit der winterlichen Zufütterung begründet wird. In einer Schweizer Studie konnte gezeigt werden, dass Schulkinder im Winter 40-50% des Iods über Milch und Milchprodukte aufnehmen (Als et al., 2003). Jahreis et al. (2007) gibt an, dass auch in Dänemark etwa 44% des Iods aus diesen Lebensmitteln stammen.

2.9.3.2 Eier

Eier haben nach Souci et al. (2000) einen mittleren Gehalt von 95 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Iod. Richter (1995) konnte zeigen, dass der Iodgehalt in Eidotter, Eiklar und im Gesamtei in Abhängigkeit von der Iodaufnahme mit dem Futter (0-100 mg/kg) deutlich ansteigt. Bei einer Iodzulage von 20 mg/kg wurde eine Iodmenge von 700 $\mu\text{g}/100\text{g}$ Ei erreicht, was für die menschliche Ernährung viel zu hoch ist. Ab einer Iodsupplementierung von 40 mg/kg kam es zu einer Abnahme der Legeleistung, sowie zu einer gehemmten Ovulationsfähigkeit und gehäuften Auftreten von Eileiterentzündungen. Kaufmann et al. (1998) führte an 40 Legehennen einen Fütterungsversuch durch. Dabei erhielten vier Tiergruppen Kaliumiodat-Zulagen (KIO_3), zwei Gruppen bekamen ein Futter das mit 5% bzw. 10% iodreichen Meeresalgen supplementiert war.

Nach vier Wochen konnte ein signifikanter Iodzuwachs im Gesamtei nachgewiesen werden. Zu Versuchsbeginn (ohne Iodzulage) lag der Gehalt an Iod bei $7,2 \mu\text{g}/\text{Ei}$ und stieg auf $51,4 \mu\text{g}/\text{Ei}$ (Kaliumiodat-Zulage von $5 \text{ mg}/\text{kg}$) bzw. auf $33,8 \mu\text{g}/\text{Ei}$ (Meeresalgen). Des Weiteren konnte Kaufmann et al. (1998) in einer fünftägigen Ernährungsstudie an 24 Probanden zeigen, dass ab dem dritten Tag, abhängig vom Iodgehalt der verzehrten Eier, die absolute Iodkonzentration im Spontanurin tendenziell anstieg.

Ungelenk (2000) führte einen Fütterungsversuch an japanischen Wachteln und Legehennen durch. Die Legehennen erhielten als Iodzusatz Kaliumiodat ($2,5$ bzw. $5 \text{ mg Iod}/\text{kg}$), die Algenarten *Laminaria digitata* ($2,5$ bzw. $5 \text{ mg Iod}/\text{kg}$) und *Ascophyllum nodosum* ($5 \text{ mg Iod}/\text{kg}$). Nach dreiwöchiger Versuchsdauer konnte im Eidotter ein signifikanter Iodanstieg von $2,0 \text{ mg Iod}/\text{kg TS}$ bei der Kontrollgruppe gegenüber $7,6 \text{ mg Iod}/\text{kg TS}$ bei der *Laminaria digitata*-Gruppe verzeichnet werden. Bei keiner der Gruppen kam es zu einer Beeinträchtigung der Leistungsparameter der Versuchstiere. In einer anschließenden Verzehrstudie mit 24 Teilnehmern wurde an 5 aufeinander folgenden Tagen je 1 Ei verzehrt. Es konnte in Abhängigkeit vom Iodgehalt der verzehrten Eier ein deutlicher Anstieg der Iodkonzentration im Urin von $109\text{-}116 \mu\text{g Iod}/\text{g Creatinin}$ gegenüber der Kontrollgruppe festgestellt werden.

In einer neueren Studie von 2004 konnte Yalçın et al. (2004) einen Anstieg des Iodgehaltes im Eiklar von $4,8 \mu\text{g}/100\text{g}$ auf $10,7 \mu\text{g}/100\text{g}$ und $18,0 \mu\text{g}/100\text{g}$ bei Iodgehalten von $0,8$ bzw. $2,9$ und $5,2 \text{ mg}/\text{kg}$ im Futter nachweisen. Der Gehalt des Eidotters war auch hier deutlich höher und stieg mit zunehmender Iodsupplementation von $44,3 \mu\text{g}/100\text{g}$ (Kontrolle) auf $66,4 \mu\text{g}/100\text{g}$ ($2,9 \text{ mg}/\text{kg}$) bzw. $112,2 \mu\text{g}/100\text{g}$ ($5,2 \text{ mg}/\text{kg}$) an. Ab einer Iodsupplementation von $11,1 \text{ mg}/\text{kg}$ im Futter war die Legeleistung der Hühner reduziert und das Eigewicht nahm ab.

Nach Anke (2007) versorgt ein normalgewichtiges Ei von 60 g einen Menschen mit $35 \mu\text{g Iod}$.

2.9.3.3 Fleisch

Generell ist der Iodgehalt im Muskelfleisch geringer als in der Milch oder in Eiern. Muskelgewebe ist im Gegensatz zu Schilddrüsen-, Milchdrüsen- und Ovarialgewebe nicht in der Lage aktiv Iod aufzunehmen. Durch Iodzulagen im Futter kann bei verschiedenen Spezies jedoch ein Anstieg der Iodkonzentration im Muskelgewebe erreicht werden.

Nach Anke (2007) speichert Schaffleisch mit etwa $100 \mu\text{g}/\text{kg}$ TS am wenigsten Iod, Schweinefleisch ist mit $150 \mu\text{g}/\text{kg}$ TS iodreicher, Rindfleisch ist mit einem Gehalt von $200 \mu\text{g}/\text{kg}$ TS gut versorgt und Hähnchenfleisch weist mit rund $275 \mu\text{g}/\text{kg}$ TS einen relativ hohen Iodgehalt auf. Diese Angaben beziehen sich auf Tiere, die mit normalem Futter gefüttert wurden.

In einem Fütterungsversuch mit 24 Schweinen erzielte Rambeck et al. (1997) einen sechsfachen Iodgehalt im Muskelfleisch. Die Ferkel erhielten bis zum Erreichen des Schlachtgewichtes ein Futter, das mit KIO_3 auf eine Iodmenge von $30 \text{ mg Iod}/\text{kg}$ angereichert war. Die Iodkonzentration nahm von 23 (Kontrollgruppe) auf $138 \mu\text{g}/\text{kg}$ ($30 \text{ mg Iod}/\text{kg}$) zu. Es kam dabei zu keinen Qualitätsveränderungen hinsichtlich der Mast- oder Schlachtleistung, sowie der Fleisch- und Fettparameter.

He et al. (2002) supplementierte Schweinefutter mit marinen Algen und Kaliumiodid. Es hatte eine Iodzulage von jeweils 5 bzw. 8 mg/kg . Nach dreimonatiger Fütterung war der Iodgehalt in der Skelettmuskulatur der mit algensupplementierten Schweine bei $86 \mu\text{g}/\text{kg}$ Frischsubstanz (FS) (5 $\text{mg Iod}/\text{kg}$ Algen) und $94 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS (8 $\text{mg Iod}/\text{kg}$ Algen), die Kaliumiodid supplementierten Schweine hatten einen Gehalt von $38 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS (5 $\text{mg Iod}/\text{kg}$) bzw. $51 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS (8 $\text{mg Iod}/\text{kg}$). Der Gehalt der Kontrollgruppe lag bei $32 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS. In diesen Studien erfolgte die Iodanalyse mit der Sandell-Kolthoff-Analyse.

Eine neue Studie von Franke et al. (2008) ergab wesentlich niedrigere Muskel/Fett Gehalte, sie lagen bei einer Iodsupplementation von $5 \text{ mg}/\text{kg}$ bei $17,1 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS. Die Iodanalyse erfolgte mit der ICP-MS (inductively-coupled-plasma mass-spectrometry) Spektrografie.

In einem Fütterungsversuch an 600 Küken setzte Groppe et al. (1991) KIO_3 in Konzentrationen von 0,1 mg, 1 mg und 10 mg Iod/kg Futter ein. Nach zwölf Wochen wurde der Iodgehalt in der Muskulatur, im Herzen, der Leber und der Niere bestimmt. In der Brustmuskulatur betrug der Iodgehalt der Kontrollgruppe $32 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS. In der höchsten Gruppe von 10 mg Iod/kg lag die Iodkonzentration bei $385 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS. In den Organen nahm der Iodgehalt proportional zu der alimentären Iodaufnahme zu. Die Organe der Gruppe von 10 mg Iod/kg Futter hatten einen überproportionalen Iodgehalt, der im Herzen $1295 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS, in der Leber $525 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS und den Nieren $558 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS betrug.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Iodaufnahme durch Muskel- fleisch von landwirtschaftlichen Nutztieren relativ gering ist und zur Iodversorgung des Menschen nach Flachowsky et al. (2006) einen Anteil von unter 5% hat. Im Gegensatz dazu stehen die Iodgehalte in Fleischwaren. Nach dem Arbeitskreis Arbeitskreis Jodmangel (2007) werden etwa 60-80% der Fleischprodukte mit Iodsalz hergestellt, wodurch bei den derzeitigen Verzehrsgewohnheiten täglich etwa $33 \mu\text{g}$ Iod aufgenommen werden. Dies wären ungefähr 15% der täglich empfohlenen Zufuhrmenge von 180-200 μg Iod.

2.9.3.4 Fisch

Im Jahr 2007 lag der pro Kopf-Verzehr von Fischerzeugnissen in Deutschland bei 16,4 kg, dabei hatten Seefische einen Anteil von 68,7%, Süßwasserfische hingegen 20,6% und Krebs- und Weichtiere 10,7% (Fisch-Informationszentrum e.V.¹) Nach Großklaus (2007) liegt die Iodversorgung durch Fischverzehr bei 9%.

Meeresfisch

Meeresfisch gehört neben Krustentieren und Algen zu den wenigen Nahrungsmitteln, die natürlicherweise eine hohe Iodkonzentration aufweisen. Aufgrund des hohen Iodgehalts des Meerwasser von 40-60 $\mu\text{g}/\text{l}$ kann sich Iod in marinen Lebewesen in besonderem Maße anreichern.

¹<http://www.fischinfo.de>

Über den Iodgehalt in Fischen gibt es in der Literatur keine einheitlichen Angaben, vielmehr scheint der Iodgehalt zwischen verschiedenen Arten erheblich zu variieren. Meeresfische weisen jedoch im Vergleich zu Süßwasserfischen einen deutlich höheren Gehalt auf. Die Iodkonzentration in den essbaren Anteilen liegt beim Lachs bei etwa $45 \mu\text{g}/100\text{g}$, beim Kabeljau bei etwa $187 \mu\text{g}/100\text{g}$. Der Iodgehalt von Süßwasserfischen erreicht im essbaren Anteil hingegen nur Gehalte zwischen $5\text{-}10 \mu\text{g}/100\text{g}$. In Tabelle 2.2 auf Seite 37 sind die Iodgehalte verschiedener Fische und anderer Meerestiere nach Karl und Münkner (1999) aufgeführt.

Sehr hohe Mengen an Iod haben die Gadidenarten Schellfisch, Kabeljau, Seelachs, Leng und Wittling. Ihre durchschnittlichen Gehalte liegen zwischen 120 und $200 \mu\text{g}/100\text{g}$. Mit einer Fischportion von 150 g dieser Fische kann somit der tägliche Iodbedarf eines Menschen vollständig gedeckt werden.

Auffallend sind die großen Schwankungen der Iodgehalte innerhalb einer Fischart. So berichten Karl und Münkner (1999) beim Kabeljau über Gehalte, die zwischen 30 und $1210 \mu\text{gIod}/100\text{g FS}$ schwanken. Als mögliche Ursachen führen sie den Fangplatz, das Alter der Fische, die Iodverteilung innerhalb der Tiere, sowie saisonale Schwankungen durch den biologischen Jahreszyklus und nicht zuletzt messtechnisch bedingte Fehler auf. In weiteren Untersuchungen stellte Karl et al. (2001) wiederum große Unterschiede beim Kabeljau von verschiedenen Fischgebieten fest. Allerdings bestanden die Unterschiede auch innerhalb eines Fanges, wodurch kein Zusammenhang mit dem Fangplatz hergestellt werden konnte.

Die verschiedenen Bestandteile der Fische haben unterschiedliche Iodkonzentrationen. So fanden Eckhoff und Maage (1997) sowie Karl und Münkner (1999) höhere Gehalte (bis zum 20-fachen) in der Haut als im Filet. Auch die Innereien haben einen deutlich höheren Iodgehalt als das Muskelfleisch (Kuznik, 2001; Schmid, 2003). Schmid (2003) konnte in den Kiemen einen 3-fach höheren Gehalt als im Filet nachweisen. Die Iodkonzentration in der rechten und linken Filethälfte sind nach Karl et al. (2001) nicht unterschiedlich, allerdings kann man einen Unterschied in der vertikalen Verteilung innerhalb eines Filets finden. So sind die inneren Teile, die nahe der Wirbelsäule liegen, in ihrem Iodgehalt niedriger als die der Fischhaut zugewandten Seite.

Süßwasserfisch

Um den Iodgehalt in Süßwasserfischen, insbesondere im Filet, zu verbessern, wurden Fütterungsversuche durchgeführt. Dabei wurden die Fischfutter mit Kaliumiodat oder mit den Meeresalgen *Laminaria digitata* und *Ascophyllum nodosum* angereichert. In allen Versuchen hatten die verschiedenen Zusätze keinen Einfluss auf die Gewichtsentwicklung, die Futtermittelverwertung und die Fleischqualität.

- Schmidter (2000) fütterte über einen Zeitraum von 26 Wochen Regenbogenforellen, denen Kaliumiodat oder Algen (*Laminaria digitata* und *Ascophyllum nodosum*) ins Futter zugesetzt wurden. Die maximale Iodkonzentration des Futters lag bei 8 mg/kg. Nach 16 Wochen konnte sie, unabhängig von der Art des Iodzusatzes, eine Steigerung des Iodgehalts in den Forellenfilets um 7 $\mu\text{g}/100\text{g}$ FS von 5 auf 12 $\mu\text{g}/100\text{g}$ FS verzeichnen.
- Kuznik (2001) verwendete bei Regenbogenforellen *Laminaria digitata* und *Ascophyllum nodosum* als Iodzusatz und hatte maximal 16 mg/kg Iod im Futter. Die Fütterung erstreckte sich über 24 Wochen. Im Filet der Kontrollfische konnte, bei verschiedenen Analyseverfahren, eine maximale Iodkonzentration von 55 $\mu\text{g}/100\text{g}$ FS gefunden werden. Die Algenfische hatten maximal 97 $\mu\text{g}/100\text{g}$ FS Iod im Filet. In einem Humanernährungsversuch war der Iodgehalt der Fische jedoch nicht ausreichend um die Iodausscheidung im Urin bei den Probanden zu steigern.
- Burkard (2002) setzte bei der Fütterung von Elsässer Saiblingen ein Futter mit 35 mg Iod/kg (*Laminaria digitata*) ein. Nach 36 Wochen lag der durchschnittliche Iodgehalt der Filets aus der Algengruppe bei 539 $\mu\text{g}/\text{kg}$ FS, was mit einem Unterschied von 396 $\mu\text{g}/\text{kg}$ FS signifikant höher war als der Iodgehalt der Kontrollfische. In einer Ernährungsstudie konnte die Iodausscheidung bei den Probanden nach dem Verzehr der algensupplementierten Fische gesteigert werden.

- Schmid (2003) führte mit den Fischen aus dem Burkard-Versuch von 2002 und derselben Iodzulagen ebenfalls einen Fütterungsversuch durch. Dabei stieg der Iodgehalt der Algenfische nach neun Monaten im Mittel auf $297 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS im Filet und auf $1504 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS in der Haut an. Die Gehalte der Kontrollgruppe lagen bei $87 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS im Filet bzw. $317 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS in der Haut.
- Kantoci (2008) konnte bei Spiegelkarpfen eine Steigerung der Iodmenge im Filet von $58 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS auf $196 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS innerhalb 21 Wochen erzielen. Das Futter war mit $55 \text{ mg Iod}/\text{kg}$ durch *Laminaria digitata* supplementiert. Die Algenfische hatten im Vergleich zu den Kontrollfischen einen 8,1-fach höheren Iodgehalt in der Haut ($482 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS bzw. $59 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS).

2.9.4 Gefahren durch iodangereicherte Lebensmittel

Seit einigen Jahren wird von Kritikern der Iodprophylaxe eine unsachliche Diskussion über die Strategien zur Beseitigung des Iodmangels geführt. Sie sehen die deutschen Verbraucher einer „Iodschwemme“ ausgesetzt, „der Kranke, die an immunogener Hyperthyreose, an thyreoidaler Autonomie oder Iod-Allergie leiden“, kaum mehr aus dem Weg gehen können und deren Gesundheit in Gefahr sei (BfR, 2004a).

Laut den Ergebnissen des bundesweiten Iod-Monitorings von 1996 lag das Maximum der Iodaufnahme (inklusive Iodtabletten) von Männern bei $437,8 \mu\text{g}$, von Frauen bei $414,3 \mu\text{g}$. Nur 5-10% der untersuchten Jugendlichen und Erwachsenen nahmen die empfohlene Iodmenge von $180\text{-}200 \mu\text{g}/\text{Tag}$ auf. 1,2% hatten mit circa $300 \mu\text{g}/\text{Tag}$ eine reichliche Iodzufuhr (BfR, 2004a). Das Bundesministerium für Gesundheit und Verbraucherschutz und Veterinärmedizin (BgVV, 2001) hat dazu 2001 eindeutig Stellung genommen: „In Deutschland kann keinesfalls von einer Überversorgung mit Iod (Iodexzess) die Rede sein“.

Die von der WHO empfohlene Obergrenze für die tägliche Iodaufnahme liegt bei $1000 \mu\text{g}/\text{Tag}$. In Deutschland ist diese Obergrenze, vor dem Hintergrund, dass die Bevölkerung lange Zeit einem Iodmangel ausgesetzt war und als Folge mit vielfach

Tabelle 2.2: Iodgehalte in Fischen und anderen Meerestieren [μg Iod/100g] Frischsubstanz (FS) nach Karl und Münkner (1999)

Fischart	Mittlerer Iodgehalt	min.	max.
Seefische			
Schellfisch (<i>Melanogrammus aeglefinus</i>)	186	14	600
Seelachs (<i>Pollachius virens</i>)	121	11	260
Kabeljau (<i>Gadus morhua</i>)	187	21	652
Wittling (<i>Merlangius merlangus</i>)	138	50	364
Leng (<i>Molva molva</i>)	175	170	181
Rotbarsch (<i>Sebastes</i> spp.)	70	12	130
Hering (<i>Clupea harengus</i>)	41	8	116
Makrele (<i>Scomber scombrus</i>)	109	10	174
Sprotte (<i>Sprattus sprattus</i>)	24		
Steinbutt (<i>Psetta maxima</i>)	180	9	675
Scholle (<i>Pleuronectes platessa</i>)	46	10	240
Kliesche (<i>Limanda limanda</i>)	66	26	122
Flunder (<i>Platichthys flesus</i>)	65	18	226
Sonstige			
Sandgarnele (<i>Crangon crangon</i>)	74	21	150
Miesmuschel (<i>Mytilus edulis</i>)	99	6	190
Süßwasserfische			
Lachs (<i>Salmo salar</i>)	45	33	65
Forelle (<i>Onchorhynchus mykiss</i>)	10	5	16
African Catfish (Herkunft Ostafrika)	2,4	2,0	2,7
Tilapia (Herkunft Ostafrika, Awasa-See)	2,5	1,4	3,5
Nilbarsch (Herkunft Ostafrika Viktoriasee)	5,6	2,4	10,1

unerkannten Schilddrüsenautonomien gerechnet werden muss, auf eine Menge von $500 \mu\text{g}/\text{Tag}$ festgesetzt. Weiter heißt es: „Der Anteil Iod im Salz ist so berechnet, dass keine Überdosierung erfolgt, auch wenn alle Nahrungsmittel mit iodiertem Speisesalz hergestellt würden“. Auch ist eine „Überversorgung mit Iod durch eine unkontrollierte Iodierung der Mineralstoffgemische bzw. der Futtermittel durch die Festlegung von Höchstmengen nach dem Futtermittelgesetz ausgeschlossen“ (BgVV, 2001). Durchschnittlich lässt sich durch Iodzusatz in Futtermitteln die Iodaufnahme in tierischen Lebensmitteln um etwa $45 \mu\text{g}/\text{Tag}$ verbessern.

Im Jahr 2004 wurde diese Stellungnahme vom Bundesinstitut für Risikobewertung aktualisiert und die Aussagen von 2001 bekräftigt: „Von einer unkontrollierten Iodzufuhr oder gar „Iodschwemme“ bei der deutschen Bevölkerung kann nicht die Rede sein. Es besteht auch für Kranke, die an immunogener Hyperthyreose, an thyreoidaler Autonomie oder an einer Iod-Allergie leiden, keine gesundheitliche Gefahr infolge der Iodexposition über Lebensmittel“ (BfR, 2004a).

Nach Scriba et al. (2007) gehört zu einer langfristigen Präventionsarbeit auch die Auseinandersetzung mit Verbraucherängsten und Gegnern der Iodprophylaxe. Ihre Aktivitäten tragen dazu bei, das Thema Iodprophylaxe aufrechtzuerhalten.

2.10 Iodbedarf

Der Iodbedarf variiert im Laufe des Lebens und ist abhängig vom Lebensalter, von verschiedenen Stoffwechselsituationen und der Menge strumiger Substanzen, die täglich mit der Nahrung aufgenommen werden. Durch das vorhandene Iod wird die Synthese der lebenswichtigen Schilddrüsenhormone limitiert. Insbesondere Säuglinge, Kinder und Jugendliche haben aufgrund ihres Wachstums und ihrer Entwicklung eine höhere Stoffwechselrate und somit auch einen erhöhten Iodbedarf, bezogen auf ihr Körpergewicht. Auch während der Schwangerschaft und des Stillens besteht aufgrund der erhöhten Stoffwechsellistung ein erhöhter Iodbedarf.

Der Minimalbedarf eines Erwachsenen wird mit $1 \mu\text{g}$ Iod/kg pro Tag oder $60\text{-}120 \mu\text{g}$ Iod/Tag angegeben. Dies ist gerade die Menge, bei der noch keine Mangelerscheinungen auftreten (BfR, 2004a). Um den Einfluss exogener Faktoren, die die Iod-

versorgung beeinflussen können ausreichend zu berücksichtigen, empfiehlt die DGE Erwachsenen täglich 180-200 μg /Iod aufzunehmen. In Tabelle 2.3 auf Seite 41 sind die Empfehlungen der DGE und der WHO für die tägliche Iodzufuhr abhängig vom Alter und besonderen Situationen wiedergegeben.

Schwangere müssen den Iodbedarf des Fetus mit abdecken, dessen Schilddrüse ab der 12. Schwangerschaftswoche mit der Schilddrüsenhormonsynthese beginnt (Köhrle, 2006). Des Weiteren ist während der Schwangerschaft die Nierendurchblutung bereits ab der ersten Schwangerschaftswoche erhöht, wodurch mehr Iod renal ausgeschieden wird (Bohnet, 2007). Um eine normale Funktion aufrecht zu erhalten, vergrößert sich die Schilddrüse in gewissem Rahmen. Unterstützt wird dieser Prozess durch das plazentar gebildete Schwangerschaftshormon HCG (humanes Choriongonadotropin), das stimulierend auf die Schilddrüse wirkt.

Bereits in den ersten sechs Schwangerschaftswochen steigt der Schilddrüsenhormonbedarf um ein Viertel an, im weiteren Verlauf nochmals um ein weiteres Viertel (Bohnet, 2007). Die WHO empfiehlt für Schwangere eine tägliche Iodzufuhr von 250 μg , auch die Empfehlung der DGE liegt mit 230 μg pro Tag in ähnlichem Bereich. Das BfR (2006) schlägt eine zusätzliche Iodprophylaxe für Schwangere und Stillende von täglich 100-150 μg Iod in Tablettenform vor. Auch dem Iodverlust über die Milch muss durch eine erhöhte Aufnahme Rechnung getragen werden.

Liegt ein Iodmangel in der Schwangerschaft oder der Stillperiode vor, so ist das für den Fetus bzw. das Neugeborene mit erheblichen gesundheitlichen Risiken verbunden. Aborte und Fehlgeburten sind bei Iodmangel 2 bis 3 mal so häufig wie ohne Iodmangel (Großklaus, 2007). Für die Entwicklung des Gehirns, das normale Wachstum und die Knochenbildung ist eine ausreichende Iodversorgung essentiell.

Menschen, die sich vegetarisch oder vegan ernähren, nehmen weniger Iod auf, da pflanzliche Nahrungsmittel einen niedrigeren Iodgehalt aufweisen als tierische, besonders wenn sie auf iodarmen Böden wachsen. Krajcovicová-Kudlácková et al. (2003) fanden in einer slowakischen Studie heraus, dass die Iodurinausscheidung bei Vegetariern (172 $\mu\text{g}/\text{l}$) und Veganern (78 $\mu\text{g}/\text{l}$) niedriger war als bei Mischköstlern

(216 $\mu\text{g}/\text{l}$). Es wird angegeben, dass 80% der Veganer und 25% der Vegetarier von einer Iodunterversorgung betroffen sind, bei den Mischköstlern seien es 9%. Auch Davidsson (1999) gibt an, dass die tägliche Iodaufnahme und -ausscheidung bei Vegetariern signifikant geringer ist als bei Mischköstlern.

Neben den empfohlenen Iodzufuhrmengen gibt es Höchstmengen, die nicht überschritten werden sollen. Sie richten sich nach der Iodversorgungslage in der Bevölkerung. Für Deutschland ist die sichere Gesamtiodymenge auf 500 $\mu\text{g}/\text{Tag}$ festgelegt.

2.11 Iodversorgung, aktueller Status

Im Mai 1990 hat die WHO eine Resolution zur Beseitigung des Iodmangels bis zum Jahre 2000 verabschiedet. Noch im September desselben Jahres haben bei einem UNICEF-Kindergipfel 71 Staatsoberhäupter eine entsprechende Verpflichtung unterzeichnet. Das Ziel, den Iodmangel bis zum Jahr 2000 zu beseitigen, wurde nicht erreicht. In einer Sondersitzung für Kinder setzte sich im Mai 2000 die Generalversammlung der Vereinten Nationen in New York das Ziel, bis 2005 Iodmangelkrankheiten zu beseitigen. Auch wenn dieses Ziel bislang immer noch nicht erreicht ist, kann doch eine deutliche Verbesserung der Iodversorgung in den letzten zehn bis zwanzig Jahren verzeichnet werden. Die Beurteilung der Iodversorgungslage basiert auf Daten, die innerhalb der Mitgliedsstaaten der WHO erhoben werden. Es stehen hierfür mehrere Indikatoren zur Verfügung: Schilddrüsenvolumen, Strumaprävalenz, Iodurinausscheidung, TSH- sowie Serum Thyreoglobulin-Konzentration im Blut. In Tabelle 2.4 auf Seite 42 sind die Kriterien der WHO für die Beurteilung der Iodversorgung anhand der Iodausscheidung im Urin aufgeführt.

Das erste bundesweite Iodmonitoring fand 1996 statt. In dieser Studie wurde bei einer Gruppe aus 2500 Jugendlichen (<14 Jahre) und Erwachsenen die Iodzufuhr über eine differenzierte Ernährungsanamnese erfasst. Aus 26 Regionen Deutschlands wurde bei 772 Wehrpflichtigen, 898 Wöchnerinnen mit ihren Neugeborenen sowie bei 566 Erwachsenen (50-70 Jahre) die Iodzufuhr und die Iodurinausscheidung untersucht. Des Weiteren wurde bei 99 Erwachsenen der 24-Stunden-Urin überprüft und in 72 Muttermilchproben sowie im Trinkwasser der Iodgehalt bestimmt. Die durchschnitt-

Tabelle 2.3: Empfohlene tägliche Iodzufuhr der DGE und WHO nach DGE (2008)^a und Andersson et al. (2007)

Deutschland und Österreich	Iod $\mu\text{g}/\text{Tag}$	WHO	Iod $\mu\text{g}/\text{Tag}$
Säuglinge		Kinder Vorschulalter 0-59 Monate	90
0 bis unter 4 Monate *	40		
4 bis unter 12 Monate	80		
Kinder		Schulkinder 6-12 Jahre	120
1 bis unter 4 Jahre	100		
4 bis unter 7 Jahre	120		
7 bis unter 10 Jahre	140		
10 bis unter 13 Jahre	180		
13 bis unter 15 Jahre	200		
Jugendliche und Erwachsene		Kinder über 12 Jahre und Erwachsene	150
15 bis unter 19 Jahre	200		
19 bis unter 25 Jahre	200		
25 bis unter 51 Jahre	200		
51 bis unter 65 Jahre	180		
65 Jahre und älter	180		
Schwangere	230	Schwangere	250
Stillende	260	Stillende	250

*Schätzwert

^a<http://www.dge.de>

Tabelle 2.4: Beurteilung der Iodversorgung anhand der Iodausscheidung im Urin [$\mu\text{g}/\text{l}$] nach der WHO (Andersson et al., 2007)

mittlere Iodausscheidung $\mu\text{g}/\text{l}$	Iodaufnahme	Beurteilung der Iodversorgung
< 20	unzureichend	schweres Ioddefizit
20-49	unzureichend	moderates Ioddefizit
50-99	unzureichend	mildes Ioddefizit
100-199	adäquat	optimale Iodversorgung
200-299	mehr als adäquat	Risiko iodinduzierter Hyperthyreosen innerhalb 5-10 Jahre nach Einführung der Iodsalzprophylaxe bei anfälligen Gruppen
>300	exzessiv	Risiko nachteiliger gesundheitlicher Konsequenzen (iodinduzierte Hyperthyreosen, Autoimmune Schilddrüsenerkrankungen)

liche Iodzufuhr betrug bei Jugendlichen und Erwachsenen $119 \mu\text{g}/\text{Tag}$, was gemessen an den Zufuhrempfehlungen ein Defizit von $60\text{-}80 \mu\text{g}/\text{Tag}$ bzw. ein Drittel der empfohlenen Menge war. In Deutschland herrschte damals ein Iodmangel vom Grad I. Nach den WHO Kriterien wurde Deutschland somit als endemisches Strumagebiet eingestuft.

Drei Jahre später untersuchte Hampel et al. (2001) bei 3065 Schülern (6-12 Jahre) an 128 Orten in Deutschland die Harniodausscheidung. Dabei lag die mediane Iodurie in der Gesamtprobe bei $148 \mu\text{g}/\text{l}$. 73% der Schüler hatten eine suffiziente Iodausscheidung, 20% einen milden, 6% einen moderaten und 1% einen schweren Iodmangel. Eine exzessive Iodausscheidung war bei 8% zu verzeichnen. Nach Hampel et al. (2001) ist der endemische Iodmangelkropf bei präpuberalen Kindern in Deutschland überwunden.

Rendl et al. (2001) fanden bei ihren Untersuchungen an 591 Kindern (7-17 Jahre) eine mittlere Uriniodkonzentration von $183 \mu\text{g}/\text{l}$.

Zöllner et al. (2002) untersuchte in Vorpommern an 4310 Probanden (20-81 Jahre) das Schilddrüsenvolumen, Iodidausscheidung im Spontanurin, sowie die TSH-Konzentration im Serum. Die mediane Iodidausscheidung im Urin lag bei $124 \mu\text{g}/\text{l}$. Frauen schieden signifikant weniger Iodid aus als Männer. Nach Zöllner et al. (2002) haben Erwachsene in Vorpommern keinen Iodmangel mehr.

Auch Gärtner et al. (2001) berichtet über einen Anstieg der Iodzufuhr, jedoch besteht immer noch ein geschätztes Defizit von rund 30%. Meng und Scriba (2002) sprechen ebenfalls von einer deutlichen Verbesserung der Iodversorgung, jedoch geben sie zu bedenken, dass die Studien der letzten Jahre überwiegend regionalen Charakter hatten und die Iodversorgung in Deutschland nur begrenzt widerspiegeln. Sie gehen davon aus, dass etwa 70% der Bevölkerung eine ausreichende Iodversorgung haben, jedoch 30% ein mildes bis moderates Defizit aufweisen. Besonders Schwangere und Stillende seien unzureichend versorgt. Auch berichtet Bohnet (2007), dass selbst in Ländern wie USA und Kanada etwa 17% dieser Bevölkerungsgruppen einen Iodmangel haben. In Europa sollen bis zu 50% der Schwangeren und Stillenden einen milden oder moderaten Iodmangel aufweisen. Er betont weiterhin, dass Ärzte neben der Folsäuresupplementierung auch dringend zu einer ausreichenden Iod- und Selenaufnahme raten sollen.

Im Rahmen des Kinder- und Jugendgesundheitssurvey wurde von Mai 2003 bis Mai 2006 ein bundesweites Iodmonitoring an 17.641 Kindern und Jugendlichen (0-17 Jahre) durchgeführt. Die Teilnehmer stammten aus 167 repräsentativen Städten und Gemeinden. Evaluiert wurde das Schilddrüsenvolumen bei den 6-17-Jährigen, die Iodausscheidung im Spontanurin, sowie die Hormonspiegel von fT_3 , fT_4 und TSH. Die mediane Iodurie betrug $117 \mu\text{g}/\text{l}$. 60% der Teilnehmer hatten eine Iodkonzentration, die über $100 \mu\text{g}/\text{l}$ lag, bei 40% der Teilnehmer lag sie unter $100 \mu\text{g}/\text{l}$ und 17% wiesen einen Gehalt $<50 \mu\text{g}/\text{l}$ auf. Eine Uriniiodkonzentration über $300 \mu\text{g}/\text{l}$ konnte bei 4% gemessen werden, was einen Iodüberschuss repräsentiert.

Gemessen an den Kriterien der WHO, nach denen $< 50\%$ der Bevölkerung eine Iodausscheidung unter $100 \mu\text{g}/\text{l}$ und $< 20\%$ unter $50 \mu\text{g}/\text{l}$ aufweisen dürfen, um eine aus-

reichende Iodversorgung in der Gesamtbevölkerung sicherzustellen, erfüllt Deutschland diese Bedingungen für eine adäquate Versorgung nach Thamm et al. (2007) nur sehr knapp.

Auch Remer (2007) betont, dass Kinder in Deutschland überwiegend nicht mehr an einem Iodmangel leiden, weiterhin jedoch ein deutlicher Präventionsbedarf besteht, da mindestens 25% der Kinder keine adäquate Iodversorgung haben. Des Weiteren weist er darauf hin, dass künftig wieder mit einer verschlechterten Iodversorgung gerechnet werden muss, da seit 2005 ein Rückgang bei der Verwendung von Iodsalz in der Lebensmittelindustrie und dem Lebensmittelhandwerk zu verzeichnen sei.

Im Rahmen der Nationalen Verzehrs Studie II (NVS II) wurde im Zeitraum von November 2005 bis November 2006, bei über 15300 Erwachsenen und Jugendlichen ein ausführliches Interview durchgeführt, um Daten über das Ernährungsverhalten, den Lebensmittelverzehr und die Nährstoffaufnahme der deutschen Bevölkerung zu erhalten. Da in den Rezepten und Mischungen des Bundeslebensmittelschlüssels kein iodiertes Speisesalz enthalten ist, wurden für die Iodzufuhr Vergleichsrechnungen durchgeführt, die jeweils die Iodaufnahme mit und ohne iodiertem Speisesalz beinhalten. Danach liegt ohne die Berücksichtigung von iodiertem Speisesalz die mediane Iodzufuhr von Männern bei $99 \mu\text{g}/\text{Tag}$ und die von Frauen bei $92 \mu\text{g}/\text{Tag}$. 96% der Männer und 97% der Frauen würden somit unter den Empfehlungen für die Iodzufuhr liegen. Mit Berücksichtigung von iodiertem Speisesalz liegt die mediane Iodaufnahme von Männern bei $233 \mu\text{g}/\text{Tag}$ und die von Frauen bei $185 \mu\text{g}/\text{Tag}$. Noch 28% der Männer und 53% der Frauen hätten hiernach eine Iodzufuhr, die unter den Empfehlungen liegen. Die wahre Iodaufnahme liegt vermutlich innerhalb der Bereiche vor und nach der Berücksichtigung von iodiertem Speisesalz. Am geringsten wurde die Iodzufuhr bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen eingestuft, des Weiteren wird Iod als Risikonährstoff bewertet (NVS II, 2008).

Seit 2004 wird Deutschland von der WHO zu den Ländern mit adäquater Iodzufuhr und optimaler Iodversorgung gezählt. Diese Bewertung stützt sich auf die Studie von Hampel et al. (2001) (de Benoist et al., 2004; Andersson et al., 2007).

Material und Methoden

3.1 Feldfütterungsversuch mit iodsupplementiertem Futter bei Süßwasserfischen

3.1.1 Versuchsaufbau

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Tierernährung und Diätetik der Ludwig-Maximilians-Universität München und zwei privaten Fischzüchtern, sowie dem Institut für Fischerei der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft wurde ein Feldfütterungsversuch an vier Süßwasserfischarten der Familie Salmonidae (Forellenfische) durchgeführt.

Ziel des Fütterungsversuchs war es, durch eine Iodanreicherung des Fischfutters mit der maximal zulässigen Iodmenge¹, den Iodgehalt in den Süßwasserfischen zu erhöhen und dadurch ein für den Menschen wertvolleres Nahrungsmittel zu erzeugen.

Alle Fische wurden mit einem Futter, das mit 20 mg/kg Iod angereichert war, gefüttert. Die Fütterungsdauer erstreckte sich über sechs Monate. Nach 11 und 24 Wochen der Fütterung mit dem Iodfutter wurden aus jeder Gruppe Fische geschlachtet, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit, auf folgende Aspekte hin untersucht wurden:

- Iodgehalt in den Fischfilets
- Iodgehalt in den restlichen Fischbestandteilen und Iodverteilung innerhalb der Fische

¹siehe unter 2.9.3.

Bei den Fischen aus der ersten Schlachtung (29.10.2007 (S1)) wurde der Iodgehalt in allen Körperbestandteilen analysiert. Von den Tieren aus der zweiten Schlachtung (28.01.2008 (S2)) wurde der Iodgehalt in den Filets untersucht. Ob sich die Iodanreicherung im Laufe der Zeit ändert und dabei möglicherweise Sättigungseffekte auftreten, sollte dabei geklärt werden.

Eine weitere zentrale Fragestellung war, wie sich die Iodgehalte von in Bayern freilebenden Fischen zu denen der Zuchtfische unterscheiden. Hierzu wurden im Januar 2008 drei wildlebende Bachforellen von Mitarbeitern der Bayerischen Landesanstalt für Fischerei aus der Obernach, einem Zufluss zum Walchensee, gefangen. Von diesen Tieren wurden ebenfalls alle Körperbestandteile untersucht.

3.1.2 Versuchstiere

Als Versuchstiere kamen Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*), Bachforellen (*Salmo trutta forma fario*), Seeforellen (*Salmo trutta lacustris*) und Seesaiblinge (*Salvelinus alpinus*) aus der Familie Salmonidae zum Einsatz. Die Seeforelle ist zoologisch gesehen eine Unterart der Bachforelle. Im folgenden werden sie jedoch, um die Sachverhalte übersichtlich darzustellen, auch als „Fischart“ bezeichnet. Als Kontrollfische standen getrennt gehaltene und gefütterte Regenbogenforellen zur Verfügung.

Die Tiere stammten aus zwei verschiedenen Betrieben, die sich im Raum Augsburg befinden. Betrieb 1 betreibt eine kommerzielle Fischzucht, aus der die Regenbogen- und Bachforellen, sowie Kontrollfische stammten. Betrieb 2 unterhält eine Hobbyfischzucht, aus der die Seeforellen und Seesaiblinge kamen.

Zu Versuchsbeginn hatten die Tiere unterschiedliches Alter und Gewicht. In Tabelle 3.1 auf der nächsten Seite sind die Ausgangsbedingungen dargestellt.

3.1.3 Tierhaltung

Alle Tiere wurden in Naturteichen, die durch Quellwasser gespeist wurden, gehalten. Die Wassertemperatur in den Teichen lag zwischen 17 °C im Sommer und 9 °C im Winter. Bei Bedarf konnte allen Teichen Sauerstoff zugeführt werden.

Tabelle 3.1: Ausgangsbedingungen zu Beginn des Feldfütterungsversuchs

	Ø Gewicht in g	Alter in Jahren
Kontrollfische (Regenbogenforellen)	400-500	2
Regenbogenforellen	300-600	2
Bachforellen	700	2
Seeforellen	500-1000	2
Seesaiblinge	120-200	1

In Betrieb 1 wurden die Regenbogen- und Bachforellen sowie die Kontrollfische jeweils in getrennten Teichen gehalten, die eine durchschnittliche Größe von 57 m x 7 m x 1,5 m haben. Der Besatz der Teiche lag zu Beginn des Versuchs zwischen 200-300 kg. Die Fische wurden vier- bis fünfmal pro Woche von Hand gefüttert. Im Dezember 2007 waren diese Teiche über einen Zeitraum von 3 Wochen mit einer Eisschicht bedeckt. In dieser Zeit erfolgte keine Fütterung.

Die Seeforellen und Seesaiblinge aus Betrieb 2 lebten zusammen in zwei Teichen. Der erste Teich hat eine Größe von 25 m x 30 m x 1,6 m, der zweite ist 50 m x 30 m x 1,6 m groß. In den Teichen befanden sich zu Versuchsbeginn ca. 2000 Fische (insgesamt ca. 1500 Seesaiblinge und ca. 500 Seeforellen). Die Fütterung erfolgte zweimal pro Woche von Hand.

3.1.4 Futter

Das iodsupplementierte Futter wurde in der Gründleinsmühle GmbH, 97332 Volkach-Obervolkach hergestellt. Dem handelsüblichen Vollextrudatfutter „FM 44/18 Alleinfuttermittel für Forellen“ wurde 0,2 % Calciumiodat zugemischt, so dass ein Futter mit einem Iodgehalt von 20 mg/kg entstand.

Das Futter bestand aus Fischmehl, Sojaextraktionsschrot, Weizen, Fischöl, Erbsenprotein, Sojabohnen getoastet, Hämoglobinpulver und enthielt 44 % Rohprotein, 18 % Rohfett, 1,4 % Rohfaser, 8 % Rohasche, 1,1 % Phosphor. Die Körnung betrug 5 mm. Dieses Futter wurde ab dem 15. August 2007 in beiden Betrieben an die Versuchstiere

verfüttert.

Die Kontrollfische aus Betrieb 1 erhielten ein handelsübliches Fischfutter der Firma Interquell „45/7 float Alleinfuttermittel für Forelle, 6 mm“. Es bestand aus Fischmehl, Weizen, Fischöl, Erbsenprotein, Sojabohnen getoastet, Hämoglobinpulver und enthielt 45 % Rohprotein, 7 % Rohfett, 3 % Rohfaser, 8 % Rohasche, 1,3 % Phosphor. Die iodgefütterten Regenbogenforellen aus Betrieb 1 erhielten zusätzlich zu dem iod-supplementierten Futter 20 % Carotinfutter. Es handelte sich hierbei ebenfalls um das Futter „Interquell 45/7 float Alleinfuttermittel für Forelle, 6 mm, mit Zusatz von Astaxanthin/Cantaxanthin“.

3.1.5 Schlachtungen

Drei Tage vor der jeweiligen Schlachtung wurden die Fische in Hälterungsbecken verbracht um dort auszunüchtern. Die Anzahl der geschlachteten Fische ist aus der Tabelle 3.2 auf der nächsten Seite, zu entnehmen. Aus den Hälterungsbecken wurden die Fische zur Schlachtung abgefischt, durch einen Kopfschlag betäubt und entblutet. Anschließend wurden die Fische auf Eis gepackt und unmittelbar in das Institut für Fischerei nach Starnberg verbracht. Dort erfolgte zunächst die Bestimmung des Schlachtgewichtes (Mettler, Giessen, SM 1520 Delta Range R). Im Anschluss daran wurden die Fische zerlegt.

Durch einen ventralen Schnitt vom Kopf bis zur Urogenitalöffnung erfolgte die Eröffnung der Fischkörper. Die Innereien und Kiemen wurden entnommen, anschließend wurden die Fische filetiert und enthäutet. Die einzelnen Bestandteile wurden getrennt gewogen, vakuumverpackt (Rische + Wertfurth GmbH, Hamburg, Polystar 230 F, RH) und bei -20°C tiefgefroren.

40 Regenbogenforellen aus der ersten Schlachtung waren für einen Räucher- und Humanernährungsversuch vorgesehen. Diesen Fischen wurden lediglich die Innereien (Magen-Darm- und Urogenitaltrakt, Herz, Leber, Milz, Nieren, Schwimmblase) und Kiemen entnommen. Die restlichen Fischkörper wurden mit Hilfe einer Metallplakette markiert und jeweils 20 Fische in zwei verschiedene Salzlaken eingelegt.

Tabelle 3.2: Anzahl der geschlachteten Tiere bei der ersten und zweiten Schlachtung

	Schlachtung 1	Schlachtung 2
Kontrollfische (Regenbogenforellen)	24	3
Regenbogenforellen	24	3
Bachforellen	6	3
Seeforellen	3	9
Seesaiblinge	3	4
Gesamtanzahl	60	22

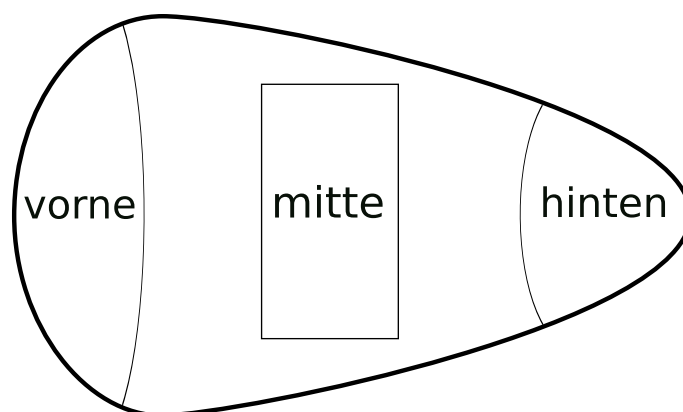


Abbildung 3.1: Probenentnahmestellen in den Fischfilets

3.2 Iodverteilung innerhalb der Fischfilets

Es wurde untersucht, ob das Iod innerhalb der Fischfilets gleichmäßig verteilt ist oder ob es Unterschiede in der Iodverteilung innerhalb der Filets gibt. Hierfür wurden die Filets von den Fischen aus der ersten Schlachtung verwendet. Aus jeweils der rechten Filethälfte wurden an drei Stellen Proben entnommen und getrennt homogenisiert. Die Entnahmestellen befanden sich vorne, in der Mitte und am hinteren Ende des Filets. Die Mengen betragen jeweils etwa 5 g. In Skizze 3.1 sind die Entnahmestellen schematisch dargestellt. Von jeder Probe wurde der Iodgehalt im Doppelansatz bestimmt.

3.3 Räucherversuch

Fische werden in unserem Kulturkreis traditionell nach verschiedenen Zubereitungsprozessen verzehrt. Eine besonders beliebte Art der Zubereitung ist das Räuchern. Burkard (2002) fand in ihren Versuchen, dass es bei Elsässer Saiblingen durch Heißräuchern zu einem Iodverlust von ca. 18% kommt. Schmid (2003) konnte zeigen, dass diese Verluste durch das Einlegen dieser Fische in iodhaltige Salzlake, ausgeglichen werden können. Durch das Einlegen in iodhaltige Salzlake kam es zu einer Zunahme von etwa 100 μg Iod/kg Frischsubstanz (FS) in den Fischfilets. Dies entsprach einer Steigerung der Iodkonzentration von 50% bei den Kontrollfischen und 15% bei den Iodfischen.

In der vorliegenden Arbeit sollte der Einfluss des Einlegens in verschiedene Salzlaken vor dem Räucherungsprozess bei Regenbogenforellen untersucht werden. Des Weiteren sollte geklärt werden, ob durch den Verzehr der geräucherten Fischfilets die Iodversorgung im Menschen verbessert werden kann und welchen Einfluss dabei die Fütterung mit und ohne Iodfutter, sowie das Einlegen in verschiedene Salzlaken hat. Für den Räucherversuch wurden Regenbogenforellen aus der ersten Schlachtung verwendet. Es wurden aus der Gruppe der Iod- und Kontrollfische je 20 Fische geräuchert. Dabei wurden je 10 Tiere einer Gruppe vor dem Räuchern in eine 7,5 %-ige Salzlake eingelegt, die keinen Iodzusatz hatte. Die anderen 10 Tiere wurden in eine ebenfalls 7,5 %-ige iodhaltige Salzlake eingelegt. Hierfür wurde Bad Reichenhaller Marken IodSalz mit einem Kaliumiodat Anteil von 0,0025 % verwendet. In Tabelle 3.3 auf der nächsten Seite ist der Räucherversuch schematisch dargestellt.

Die Einlegdauer betrug bei beiden Gruppen 15 Stunden. Nach dieser Zeit wurden die Fische gewässert, aufgehängt und bei 110 °C bis zum Erreichen einer Kerntemperatur von 60 °C gegart. Anschließend wurden sie in einem Industrieräucherofen dem Rauch ausgesetzt.

Nachdem Räuchern erfolgte eine Gewichtsbestimmung der Schlachtkörper. Die Fische wurden filetiert, enthäutet und die einzelnen Bestandteile getrennt gewogen, vakuumverpackt und bei -20 °C tiefgefroren.

Tabelle 3.3: Anzahl der Fische in den verschiedenen Gruppen des Räucherversuchs

	iodhaltige Salzlake	normale Salzlake
Kontrollfische (Regenbogenforellen)	10	10
Regenbogenforellen	10	10

Um zu sehen, ob sich das Iod in den geräucherten Fischen gleich verteilt wie bei den rohen Fischen, wurde der Iodgehalt sowohl in den Filets als auch in der Haut und in den Restkörpern bestimmt.

3.4 Humanernährungsversuch

In einem Humanernährungsversuch sollte eine Antwort auf die Frage, ob durch den Verzehr der geräucherten Regenbogenforellen eine bessere Iodversorgung im Menschen erzielt werden kann, gefunden werden. Welchen Einfluss dabei die unterschiedliche Fütterung und das Einlegen in iodhaltige und normale Salzlake hat, sollte hierbei geklärt werden.

Versuchsaufbau:

26 Probanden nahmen an dem neuntägigen Versuch teil. Täglich mussten alle Probanden den ersten Morgenurin sammeln und anschließend sofort bei -20°C tiefgefrieren. An Tag 3 und 6 des Versuchs verzehrte jeder Proband um die Mittagszeit zwischen 180-200 g kaltes, geräuchertes Fischfilet.

Im Versuchszeitraum durfte weiterhin iodiertes Speisesalz verwendet werden. Lediglich der Verzehr stark iodhaltiger Nahrungsmittel wie etwa Meeresfisch, Algen, Iodtabletten war verboten, sofern sie nicht aus medizinischen Gründen täglich supplementiert werden mussten. In einem Fragebogen wurden die Essgewohnheiten der Probanden erfasst. In Tabelle 3.4 auf der nächsten Seite ist der zeitliche Ablauf des Humanernährungsversuchs schematisch dargestellt.

Tabelle 3.4: Zeitlicher Ablauf des Humanernährungsversuchs

	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 4	Tag 5	Tag 6	Tag 7	Tag 8	Tag 9
morgens	Urin	Urin	Urin	Urin	Urin	Urin	Urin	Urin	Urin
mittags			Fisch			Fisch			

Tabelle 3.5: Anzahl der Probanden in den verschiedenen Gruppen des Humanernährungsversuchs

	Kontroll- fisch & normale Salzlake	Kontroll- fisch & Iodsatzlake	Iodfisch & normale Salzlake	Iodfisch & Iodsatzlake
Anzahl der Probanden	6	6	7	7

Die Probanden waren in 4 Gruppen eingeteilt, die entweder Iodfisch aus iodhaltiger oder normaler Salzlake oder Kontrollfisch aus iodhaltiger oder normaler Salzlake zu essen bekamen. Welcher Gruppe sie angehörten, wussten die Probanden bei dieser Blindstudie nicht. Die Anzahl der Teilnehmer pro Gruppe ist in Tabelle 3.5 aufgeführt.

3.5 Iodanalytik

Für die Iodanalyse stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. In der vorliegenden Arbeit wurde die katalytische Iodbestimmung nach Sandell und Kolthoff (1937) verwendet. Grundsätzlich gliedert sich die katalytische Iodbestimmung in zwei Abschnitte:

- **Aufbereitung des Probenmaterials:** Bei der Aufbereitung des Probenmaterials wird zunächst die organische Struktur aufgeschlossen. Anschließend werden die Proben mineralisiert und schließlich das vorhandene Iod in wässrige

Lösung überführt. Der Probenaufschluss ist notwendig, um andere Substanzen, wie etwa Nitrate, Thiocyanate oder Eisenionen, die die Analytik beeinflussen könnten, zu beseitigen (Dunn, 1993).

Die Probenaufbereitung ist ein anfälliger Schritt in der Iodanalyse, da zum einen molekulares Iod sehr flüchtig ist und zum anderen die Reagenzien für den Probenaufschluss die nachfolgende katalytische Messung nicht beeinflussen sollen. Der Aufschluss der organischen Substanzen aus den Fischproben und den Futtermitteln geschah mit Hilfe der alkalischen Trockenveraschung, im Falle der Iodbestimmung aus dem Urin mit der sauren Nassveraschung.

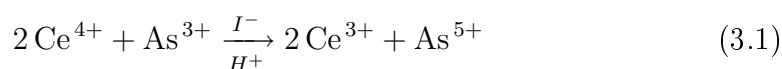
- **Katalytische Iodbestimmung:** Die eigentliche Iodbestimmung basiert auf dem von Sandell und Kolthoff (1937) entwickelten und von Groppel (1987) modifizierten Verfahren. Es lässt sich für die Bestimmung sehr kleiner Iodmengen einsetzen.

Das Prinzip dieser Methode beruht auf dem katalytischen Effekt von Iod bei einer Redoxreaktion. Den wässrigen Veraschungslösungen werden schwefelsaure Arsen- und Cerlösung zugegeben. Das gelbe Ce^{4+} wird in saurer Umgebung durch As^{3+} zu farblosem Ce^{3+} reduziert. Diese Entfärbungsreaktion verläuft ohne Katalysator sehr langsam. Ist jedoch Iodid vorhanden, so wird diese Reaktion spezifisch katalysiert.

Die Entfärbung der Reaktionslösung in einer bestimmten Zeit dient als Maß für die in der Probe enthaltene Iodidkonzentration und kann durch eine photometrische Messung quantitativ bestimmt werden.

Das Reduktionsmittel Arsen wird im Überschuss zugegeben, wodurch gewährleistet wird, dass das gesamte gelbe Ce^{4+} in die reduzierte, farblose Form Ce^{3+} überführt werden kann.

Schematische Darstellung der Sandell-Kolthoff-Reaktion:



Die Reaktionsgeschwindigkeit hängt von der Temperatur, Ce^{4+} - und Iodidkonzentration ab. Da im Labor unter nahezu konstanten Temperaturbedingungen gearbeitet wurde und allen Proben dieselbe Menge an Ce^{4+} -Lösung zugegeben wurde, hängt die Reaktionsgeschwindigkeit überwiegend von der Iodidkonzentration ab. Je höher der Iodgehalt ist, umso schneller läuft die oben beschriebene Reaktion ab und desto mehr hat sich die Reaktionslösung nach einer bestimmten Zeit entfärbt.

Die Entfärbungsreaktion wurde mit Hilfe eines Photometers bei einer Wellenlänge von 405 nm (Fisch- und Futterproben) bzw. 420 nm (Urinproben) gemessen.

Bei jedem Probendurchlauf wurde anhand bekannter Iodkonzentrationen von Arbeitsstandards eine Eichkurve erstellt. Aufgrund der im Laufe der Reaktionszeit abnehmenden Ce^{4+} -Konzentration ergab sich eine exponentielle Funktion, die durch $I = I_0 \cdot e^{-b \cdot c}$ charakterisiert ist. I beschreibt die Extinktion bei der gemessenen Wellenlänge, c gibt die Iodkonzentrationen der Probe in $\mu\text{g}/\text{l}$ wieder.

Lagen die Probenkonzentrationen über dem des größten verwendeten Iodstandards, so wurden bei einer erneuten Messung Verdünnungsreihen angelegt, um in den, durch die verwendeten Standards, definierten Messbereich zu gelangen.

3.5.1 Iodkonzentration im Futter und in den Fischen

Die Iodkonzentration in den Futtermitteln und in den Fischen wurde mit der **alkalischen Trockenveraschung** bestimmt. Dabei wurde die organische Struktur durch Kalilauge (KOH) und Zinksulfat (ZnSO_4) zerstört. Anschließend erfolgte die Mineralisierung des Probenmaterials durch Oxidation aller Kohlenstoffverbindungen während einer mehrstündigen Veraschung im Muffelofen. Es wurden alle Proben im Doppelansatz gemessen. Wichen die Ergebnisse der Doppelansätze mehr als 10% voneinander ab, so wurde ein erneuter Probenaufschluss mit anschließender Veraschung durchgeführt. Es wurden dann die Mittelwerte aus den verschiedenen Analysen gebildet. Die Iodanalyse vom Aufschluss der Proben bis zur Messung dauerte jeweils vier Tage.

Alkalische Veraschung

Geräte:

- Universal-Zerkleinerer (Krupps, Solingen, Typ Speedy 75; Retsch[®], Haan, Grindomix Typ GM 200; Heidolph, Schwabach, Typ SilentCrusher M)
- Pürierstab (Braun, Kronberg, Typ Minipimer MR 305)
- Laborwaage (Satorius, Göttingen, Typ CP224S)
- Faltenfilter (Munktell Filter AB, Falun Schweden 2/N 389 ø110 mm)
- Trockenschrank (Heraeus, Hanau, Typ UT 20)
- Muffelofen (Nabertherm, Lilienthal, Controller P 320; Heraeus, Hanau, Typ M 110 thermicon P[®])
- Rotator (Heidolph, Kehlheim, Typ REAX 2)
- Tischzentrifuge (Eppendorf AG, Hamburg, Typ 5810 R)
- Vortex Mixer (IKA[®]Werke GmbH & Co. KG, Staufen, Typ MS2 Minishaker)
- Spektralphotometer (Thermo-Spectrometer, Rochester New York, Model: Genesys 10 UV)
- Zentrifugengläser mit Rundboden, temperaturresistentes Spezialglas (SCHOTT-Rohrglas, Mitterteich, DURAN[®]16x130 mm)
- Einmal-Rundbodenröhrchen aus Polypropylen 95x16 mm (STARSTEDT AG & Co, Nümbrecht)
- Einmal-Küvetten Plastibrand[®]2,5 ml (BRAND GmbH & CO KG, Wertheim)

Reagenzien: Alle Chemikalien wurden nach dem Reinheitsgrad „pro analysi“ hergestellt. Es wurde Reinstwasser verwendet.

- **4 n KOH:** 224,4 g KOH (Merck-Nr.C 505933) wurden in H₂O in einem geeichten 1 l Glaskolben gelöst und mit H₂O auf das Volumen von 1 l aufgefüllt.
- **20 % ZnSO₄-Lösung:** 356,2 g ZnSO₄ x 7 H₂O (Merck-Nr. 1.08883.0500) wurden in einem geeichten 1 l Glaskolben auf das Volumen von 1 l mit H₂O aufgefüllt.

- **0,33 n HCl:** 1:30 Verdünnung von 37 % HCl (Merck-Nr. 1.00317.2501). In einem geeichten 1 l Glaskolben wurden 33,33 ml 37 % HCl mit H₂O auf das Volumen von 1 l aufgefüllt.
- **Arsenlösung:** Es wurden 6 g NaOH (Roth[®], Art.Nr. 9356.5) in ca. 50 ml H₂O gelöst und darin 9,89 g As₂O₃ (Sigma[®], Arsenic(3)oxid, A-1010) unter ständigem Rühren aufgeschwemmt.
Danach erfolgte abwechselnd unter ständigem Rühren und Abkühlen die Zugabe von 160,8 ml konz. H₂SO₄ (Merck-Nr. 1.00713.2500) und 500 ml H₂O. Die Lösung wurde anschließend auf das Volumen von 1 l aufgefüllt und längere Zeit unter mittlerer Hitze gerührt. Die abgekühlte Lösung wurde filtriert und im Dunkeln bei Raumtemperatur gelagert. Die Haltbarkeit betrug mehrere Monate.
- **Cer-Lösung:** 5,38 g Ammonium-cer(IV)-sulfatdihydrat Ce(NH₄)₄(SO₄)₄ x 2 H₂O (Merck-Nr.102273) wurden in circa 200 ml H₂O aufgeschwemmt. Unter ständigem Rühren und Kühlen wurde portionsweise 80,4 ml konz. H₂SO₄ zugegeben und die Festsubstanz gelöst. Nach dem Abkühlen wurde die Lösung mit H₂O auf das Volumen von 1 l aufgefüllt. Die Lösung wurde bei Dunkelheit und Raumtemperatur aufbewahrt, ihre Haltbarkeit betrug mehrere Monate.
- **Wässrige Iodstandards:** Es wurden Arbeitsstandards der Konzentrationen 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 µg Iod/l hergestellt. Hierzu wurden 1,686 g KIO₃ (Merck-Nr. B995851) in 1 l H₂O gelöst. 1 ml dieser Lösung wurde erneut mit H₂O auf das Volumen von 1 l aufgefüllt. Die so entstandene Stammlösung enthält eine Konzentration von 1 mg Iod/l bzw. 1 µg Iod/ml. Durch weitere Verdünnung dieser Stammlösung wurden die oben genannten Arbeitsstandards hergestellt. Die Iodstandards wurden in verschlossenen Glaskolben im Kühlraum aufbewahrt, die Haltbarkeit betrug drei Monate. Als Nullwert (Blindwert) wurde Reinstwasser verwendet.

Mineralisierung der Proben: Bevor die Proben mineralisiert wurden, mussten sie in einem ersten Schritt homogenisiert werden. Die Futtermittelproben wurden mit einer handelsüblichen Mulinette bearbeitet. Die verschiedenen Fischproben wurden mit Mulinetten oder einem Universal-Zerkleinerungsstab homogenisiert und bis zur Analyse tiefgefroren.

Als Veraschungsgefäße wurden hitzeresistente DURAN[®]-Gläser verwendet. In diese Gefäße wurden die Proben, ohne die Wand zu berühren, mit einem Spatel oder mit Einmalspritzen eingewogen. Die Einwaage der Futterproben betrug zwischen 40 und 70 mg Trockensubstanz, die Proben aus den Fischen circa 0,5 g Frischsubstanz. Die Einwaagen wurden notiert.

Anschließend wurden 0,5 ml H₂O zugegeben und die Proben wurden für etwa 2 Stunden zum Quellen stehen gelassen. Es folgte die Zugabe von 0,5 ml 4 n KOH und 0,5 ml H₂O zu jeder Probe. Anschließend wurden die Proben mit einem Spatel gemischt und über Nacht abgedeckt bei Raumtemperatur stehen gelassen.

Am darauf folgenden Tag wurden je 0,5 ml der 20 %-igen ZnSO₄-Lösung hinzugegeben und das Material auf dem Vortexer gemischt.

Darauf erfolgte eine Trocknung bei 110 °C für 24 Stunden im Trockenschrank.

Das eingetrocknete Probenmaterial wurde anschließend mit einer Fugenkelle vom Rundboden und der Wand der Zentrifugengläser gelöst und fein zerkleinert.

Die Proben wurden nun in programmierbare Muffelöfen verbracht. Durch Drehen der Zentrifugengläser wurde das feingemahlene Probenmaterial über die gesamte Länge verteilt, um die Oberfläche zu vergrößern. Dadurch sollte eine vollständige Verbrennung sämtlicher Kohlenstoffverbindungen garantiert werden. Die Probengefäße wurden auf ein Metallgestell gelegt, so dass sie schräg nach oben lagen und einen Winkel von ca. 30 ° hatten. Das Metallgestell wurde mittig im Ofen platziert.

Es folgte eine weitere neunstündige Trocknung bei 150 °C. Anschließend begann die Veraschung. Die Temperatur wurde langsam in mehreren Stufen auf 600 °C erhöht. Bei dieser Temperatur erfolgte die eigentliche Veraschung. Aus Tabelle 3.6 auf der nächsten Seite ist der Veraschungsprozess ersichtlich.

Tabelle 3.6: Zeitlicher Ablauf des Veraschungsprozesses

	Temperatur vorher [°C]	Temperatur nachher [°C]	Dauer [h]
Trocknung	20	150	9
Vorveraschung	150	300	2
	300	500	2
	500	600	1
Veraschung		600	3

Der langsame Temperaturanstieg war nötig, um mögliche Iodverluste zu minimieren. Nach der Veraschung haben sich die Muffelöfen automatisch abgeschaltet. Um eine schnellere Abkühlung der Proben zu erreichen, wurde das Metallgestell etwas aus den nachglühenden Muffeln gezogen. Nachdem die Proben auf Raumtemperatur abgekühlt waren, wurde jeder Probe 5 ml H₂O zugegeben und die Reagenzgläser sofort mit einem Stöpsel dicht verschlossen.

Vorbereitung der Iodstandards: Je 1 ml des Arbeitsstandards (0-500 µg Iod/l) wurde in ein Reagenzglas einpipettiert. Anschließend wurden jeweils 0,5 ml KOH und 0,5 ml 20 %-ige ZnSO₄ sowie 3 ml H₂O zugegeben, gemischt und die Reagenzgläser mit einem Stöpsel verschlossen. Es wurden Doppelansätze hergestellt. Die Standards wurden nun wie die Proben behandelt und hatten dasselbe Volumen und Ionenmilieu wie diese.

Aufbereitung der Proben und Iodstandards: Um die Asche im Wasser zu lösen, wurden die Proben in einem Rotator 20 min. über Kopf geschüttelt. Mit den Standards wurde, um beide identisch zu behandeln, ebenso verfahren. Anschließend erfolgte eine 10-minütige Zentrifugation bei 3000 U/min. Es wurde 1 ml des Überstandes in Einmal-Rundbodenröhrchen abpipettiert, in denen sich bereits ein Gemisch aus 1 ml Arsen-Lösung und 1,5 ml 0,33 n HCl befand. Der Inhalt wurde gemischt und danach mindestens 15 min. stehen gelassen.

Katalytische Messung: Die Vorbereitung und Messung der Proben erfolgte jeweils in 30 Sekunden Intervallen (Stoppuhr). Die Reihenfolge der Proben war immer dieselbe. Zu jeder Probe wurde 1 ml Cer-Lösung gegeben und sofort auf dem Vortexer gemischt. Nach 10 min. wurde das Gemisch aus den Einmal-Rundbodenröhrchen in eine Einmal-Makro-Küvette mit der Schichtdicke von 1 cm überführt. Genau 11 min. nach der Cer-Zugabe wurde die durchgelassene Lichtintensität der Lösungen bei 405 nm photometrisch gemessen.

Berechnung der Iodkonzentration: Mit Hilfe der gemessenen Standards als Referenzwerte wurde für jede Messreihe eine Eichkurve erstellt. Die bekannten Iodkonzentrationen wurden gegen die gemessene Intensität aufgetragen. Nach dem Lambertschen Gesetz lässt sich die Abnahme der Lichtintensität beim Durchqueren einer Probelösung durch eine abfallende Exponentialfunktion wie in Gleichung 3.2 beschreiben. Dabei ist d die Dicke der Küvette und ϵ der Extinktionskoeffizient. $\epsilon \cdot d$ kann man durch den Parameter b beschreiben. Die Parameter b und I_0 ändern sich während der Messung nicht, da der Extinktionskoeffizient und die Küvetten Dicke konstant sind und die eingestrahelte Lichtintensität sich nicht ändert.

$$I = I_0 \cdot e^{-\epsilon \cdot d \cdot c} = I_0 \cdot e^{-b \cdot c} \quad (3.2)$$

Zur Bestimmung der Parameter b und I_0 wurde die Exponentialfunktion 3.2 durch einen Fit unter Variation der Parameter an die Messreihe der Standards angepasst. Durch Umformen von Gleichung 3.2 erhält man die Extinktion und Konzentration bei einer bestimmten Wellenlänge λ .

$$E_\lambda = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \epsilon \cdot d \cdot c = b \cdot c \rightarrow c = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \cdot \frac{1}{b} \quad (3.3)$$

Durch Einsetzen der Parameter b und I_0 , sowie der verblieben Restintensität I nach dem Durchqueren der Probelösung, kann nun die Iodkonzentration (c) errechnet werden. Die erhaltene Konzentration entsprach dabei der Iodkonzentration in der einge-

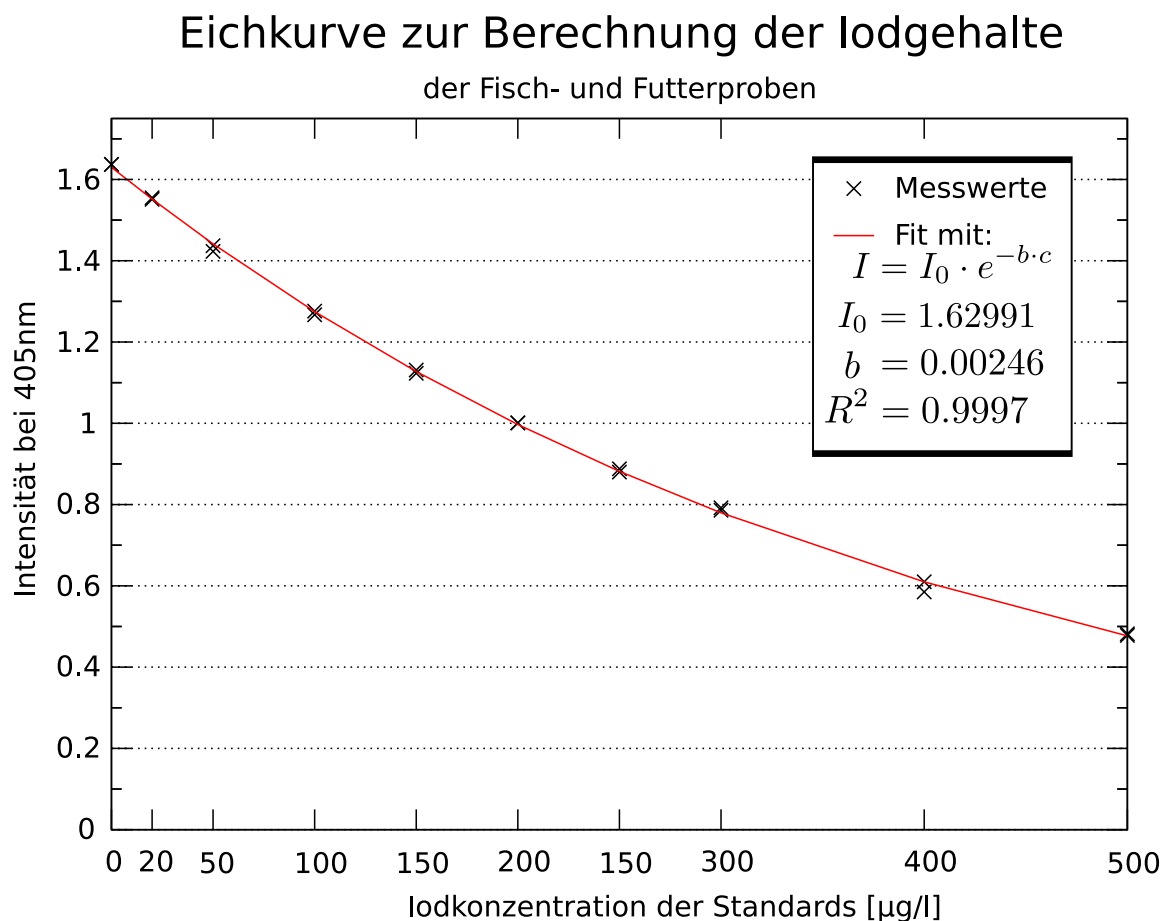


Abbildung 3.2: Eichkurve zur Bestimmung der Iodkonzentration in den Fischproben und den Fischfuttern. Hierbei ist I die Restintensität nach dem Durchqueren der Probelösung, c bezeichnet die Iodkonzentration der Probe in $\mu\text{g/l}$. Der Parameter b wird aus dem Extinktionskoeffizient ϵ multipliziert mit der Küvettendicke d gebildet. I_0 ist die Intensität bei der Konzentration 0.

wogenen Probemenge. Durch Division durch die Einwaage erhielt man den Iodgehalt in $\mu\text{g/kg}$ der ursprünglichen Substanz (Frischsubstanz = FS).

Lag der Iodgehalt über dem des höchsten Arbeitsstandards, so wurde die Probe in einer weiteren Reihe erneut verascht und aus dem abzentrifugierten Überstand wurde eine Verdünnungsreihe angelegt, die erneut gemessen wurde.

3.5.2 Iodkonzentration im Urin

Die Iodkonzentration in den Urinproben aus dem Humanernährungsversuch wurde mit Hilfe der **sauren Nassveraschung** bestimmt. Hierbei erfolgte der Aufschluss der organischen Struktur durch Ammoniumpersulfat. Die Mineralisierung wurde durch Erhitzen der Proben auf 100 °C erzielt. Alle Proben wurden im Doppelansatz gemessen. Diese Methode nach Dunn et al. (1993) gilt als das von der WHO (de Benoist et al., 2007) empfohlene Messverfahren für die Iodanalyse in Urinproben.

Saure Nassveraschung

Geräte:

- Laborwaage (Satorius, Göttingen, Typ CP224S)
- Beheizbarer Magnetrührblock (Firma Janke & Kunkel, IKA-Labortechnik[®], Staufen)
- Faltenfilter (Munktell Filter AB, Falun Schweden 2/N 389 ø110 mm)
- Vortex Mixer (IKA[®]Werke GmbH & Co. KG, Staufen, Typ MS2 Minishaker)
- Beheizbarer Metallblock für Reagenzgläser (Henry Troemner LLC, Thorofare, VMR Digital Heatblock VI)
- Spektralphotometer (Thermo-Spectrometer, Rochester New York, Model: Genesys 10 UV)

Reagenzien: Alle verwendeten Reagenzien entsprachen dem Reinheitsgrad „pro analysi“. Als Wasser wurde Reinstwasser verwendet.

- **Ammoniumpersulfat:** Es wurden 114,1 g $\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_8\text{S}_2$ (Roth[®], Art.Nr. 9178.1) in 500 ml deionisiertem Wasser gelöst. Die Lagerung erfolgte im Dunkeln. Die Haltbarkeit betrug circa 4 Wochen.
- **5 n H_2SO_4 :** 139 ml konz. H_2SO_4 (Merck-Nr. 1.00731.2500) wurden langsam zu 700 ml H_2O gegeben. Nachdem die Lösung abgekühlt war, wurde sie mit H_2O auf das Volumen von 1 l aufgefüllt.

- **Arsen-Lösung:** In einen 2l Erlenmeyer-Kolben wurden 20 g As_2O_3 (Sigma[®], Arsenic(3)oxid, A-1010) und 50 g NaCl (Merck-Nr. 106404) eingewogen. Unter ständigem Rühren wurden langsam 400 ml 5 n H_2SO_4 zugegeben. Anschließend wurde mit H_2O auf das Volumen von 1l aufgefüllt und unter niedriger Hitze einwirkung bis zur Auflösung des Bodensatzes gerührt. Nachdem die Lösung auf Raumtemperatur abgekühlt war, wurde sie mit H_2O auf das Volumen von 2l aufgefüllt und anschließend abfiltriert. Die Lagerung erfolgte im Dunkeln bei Raumtemperatur, die Haltbarkeit betrug mehrere Monate.
- **3,5 n H_2SO_4 :** Zu 800 ml H_2O wurden langsam 97 ml konz. H_2SO_4 (Merck-Nr. 1.00731.2500) zugegeben. Nachdem Abkühlen wurde mit H_2O auf das Volumen von 1l aufgefüllt.
- **Cer-Lösung:** 48 g Ammonium-cer-(IV)-sulfatdihydrat $\text{Ce}(\text{NH}_4)_4(\text{SO}_4) \times 2\text{H}_2\text{O}$ (Merck-Nr. 102273) wurden in 1l 3,5 n H_2SO_4 langsam gelöst. Die Lagerung erfolgte bei Raumtemperatur im Dunkeln, die Haltbarkeit betrug mehrere Monate.
- **Iodstandards:** Es wurden dieselben Iodstandards wie bei der alkalischen Trockenveraschung verwendet. Als Nullwert diente Reinstwasser.

Probenaufschluss durch Nassveraschung: Die Standards und Urinproben wurden gleich behandelt, es wurden jeweils Doppelansätze untersucht. Die Konzentrationen der Arbeitsstandards betrug 0-300 μg Iod/l, sie wurden in jedem Durchgang neu angesetzt.

Die Veraschung erfolgte in hitzebeständigen DURAN[®]-Gläsern. Ihre Höhe betrug 13 cm und sie passten in die Bohrungen des Wärmeblocks. Nach gründlichem Waschen mit Spülmittel und anschließendem Klarwaschen mit Reinstwasser konnten sie mehrmals verwendet werden.

Vor der Probeentnahme wurden die Urinproben auf dem Vortexer gut durchgemischt. So wurden alle enthaltenen Bestandteile (z.B. Sediment, abgeschilferte Zellen) auf-

geschwemmt und mit dem Aliquot entnommen.

Je 250 μl von dem Probematerial und den Standards wurden in je ein DURAN[®]-Glas einpipettiert. Es folgte die Zugabe von 1 ml Ammoniumpersulfat-Lösung. Unter einem Abzug wurden die Proben im Wärmeblock eine Stunde lang bei 100 °C verascht. Unmittelbar nach der Veraschung waren die Proben farblos.

Katalytische Messung: Nachdem die Proben auf Raumtemperatur abgekühlt waren, wurde jeder Probe und jedem Standard 2,5 ml Arsen-Lösung zugegeben. Das Gemisch wurde auf dem Vortexer gemischt und anschließend für mindestens 15 min. stehen gelassen. Anschließend erfolgte in Abständen von 30 Sekunden (Stoppuhr) die Zugabe von 300 μl Cer-Lösung in jedes Probengefäß. Das Gemisch wurde sofort auf dem Vortexer gemischt. Nach etwa 25 min. wurde das Gemisch in Einmal-Küvetten Plastibrand[®] mit einer Schichtdicke von 1 cm überführt. Exakt 30 min. nach der Cer-Zugabe wurde im Spektralphotometer bei einer Wellenlänge von 420 nm die durchgelassene Lichtintensität gemessen. Die Messungen erfolgten in denselben Reihenfolgen und denselben Zeitintervallen wie die Cer-Zugabe.

Berechnung der Iodkonzentration: Die Berechnung der Iodurinkonzentration erfolgte analog zu 3.5.1 auf Seite 59. Da das vermessene Flüssigkeitsvolumen der Standards und der Proben äquivalent war, hatten die errechneten Probenkonzentrationen dieselben Einheiten wie die Standards (ng Iod/ml bzw. μg Iod/l) und mussten nicht zusätzlich durch die Einwaage dividiert werden. Ein beispielhafter Fit einer Urinmessung ist in Abbildung 3.3 auf der nächsten Seite dargestellt.

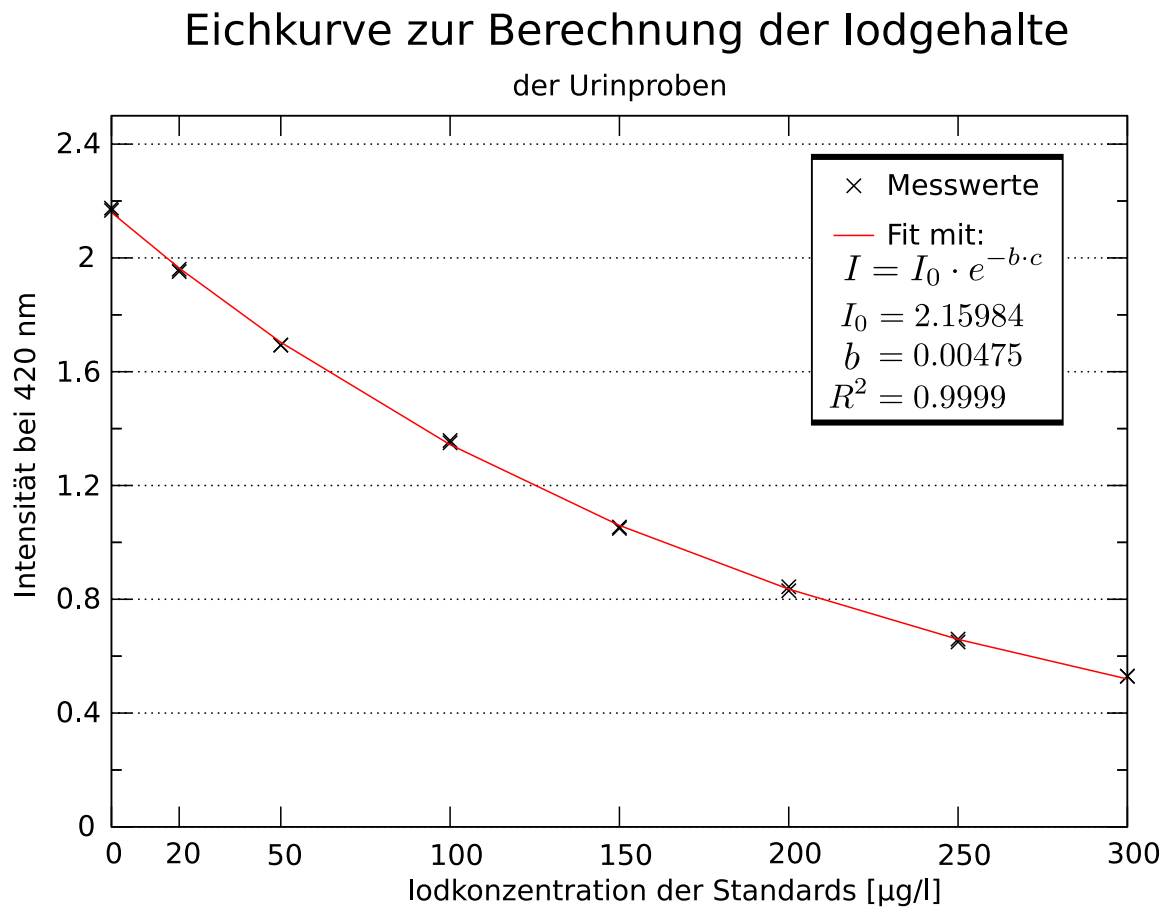


Abbildung 3.3: Eichkurve zur Bestimmung der Iodkonzentration im Urin. Hierbei ist I die Restintensität nach dem Durchqueren der Probelösung, c bezeichnet die Iodkonzentration der Probe in $\mu\text{g/l}$. Der Parameter b wird aus dem Extinktionskoeffizient ϵ multipliziert mit der Küvettendicke d gebildet. I_0 ist die Intensität bei der Konzentration 0.

3.6 Creatininbestimmung

Aus den Urinproben der Ernährungsstudie wurde neben dem Iod- auch der Creatin-gehalt bestimmt. Da die tägliche und individuelle, zum Teil sehr unterschiedliche, Flüssigkeitsaufnahme das Urinvolumen und somit die Urinkonzentration stark beeinflussen und verändern können, war es sinnvoll, die Iodkonzentration nicht auf das Urinvolumen zu beziehen, sondern auf eine relativ konstante Größe, wofür das Creatinin gut geeignet war.

Die Creatininbestimmung erfolgte nach einem modifizierten Verfahren nach Jaffé. Das Reaktionsprinzip beruht auf der Bildung eines gelben Farbkomplexes, den Creatinin in alkalischem Milieu mit Pikrinsäure bildet. Die Farbintensität des Creatinin-Pikrinsäure-Komplexes ist proportional zur Creatininkonzentration und wird photometrisch gemessen.

In alkalischem Milieu:



Geräte:

- Multipipette (Eppendorf AG, Hamburg, „Research pro“)
- Microplate Absorbance Reader (Tecan, Crailsheim, Sunrise Remote)
- Thermomixer (Eppendorf AG, Hamburg, Thermomixer comfort, MTP)

Reagenzien und Materialien:

- 3 Mikrotiterplatten mit je 96 Kavitäten (Greiner Bio-One GmbH, Frickenhausen)
- Creatinin Assay KIT Metra[®] (Osteomedical GmbH, Bünde, bestehend aus 3 Creatinin-Standards mit 5, 20 und 40 mmol/l Urin-Puffer-Matrix, 1 Creatinin Low Control und 1 Creatinin High Control, Colorreagenz: 14 ml 0,14 %-ige Pikrinsäure, sowie 1 n NaOH (2ml))

Verarbeitung der Proben und Messung: In die erste Mikrotiterplatte wurden 190 μl Reinstwasser und 10 μl Urin, sowie die Standards einpipettiert. Die Proben wurden durch mehrmaliges Ein- und Aussaugen aus den Pipettenspitzen gemischt. Anschließend wurde in eine zweite Mikrotiterplatte 50 μl Reinstwasser und 50 μl Probe aus der ersten Mikrotiterplatte einpipettiert. In eine weitere Mikrotiterplatte wurden 50 μl aus der zweiten Platte und 150 μl Colorreagenz gegeben. Es lag nun eine Verdünnung von 1:40 vor. Die Proben wurden im Thermomixer 30 Minuten inkubiert. Anschließend erfolgte bei 490 nm die photometrische Messung mit dem Mikrotiterplattenleser. Lagen die Messwerte unterhalb der Standards, wurden in einem erneuten Durchgang größere Probenvolumina verwendet.

3.7 Weender-Analyse des Futters

Mit der Weender-Analyse wurden ausgewählte Nährstoffe des Kontroll- und Iodfutters bestimmt.

3.7.1 Trockensubstanz

Mit der Trockensubstanz werden alle nichtflüchtigen Bestandteile des Futters erfasst. Dazu wurden 100-150 g der Futterproben mit einer Mulinette zerkleinert und etwa 10 g in eine zuvor gewogene Aluschale eingewogen. Anschließend erfolgte im Trockenschrank bei 103 °C eine Trocknung bis zur Gewichtskonstanz.

$$\text{Trockensubstanz [\%]} = \frac{\text{Auswaage [g]} - \text{Gewicht Aluschale [g]}}{\text{Einwaage [g]}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

3.7.2 Rohfaser

In der Rohfaser sind unlösliche Anteile eines Futters, die nach der Behandlung mit verdünnter Säure und Lauge zurückbleiben, enthalten. Es befinden sich darin Anteile von Zellulose, Hemizellulose, Lignin und andere Zellwandstoffe.

Geräte und Reagenzien:

- Foss Fibertec hot extractor 2010 (Foss, Hamburg)
- Fibertec cold extractor 1021 (Foss, Hamburg)
- Glasfiltertiegel mit eingeschmolzenem Glasfilter (Foss, Hamburg)
- Filtrationshilfsmittel (Celite 545, Merck, Darmstadt, Art.Nr. 102693)
- Antischaummittel (Octanol, Roth[®], Karlsruhe, Art.Nr. 4439.1)
- Schwefelsäure 1,25 %ig (Merck, Darmstadt, Art.Nr.109912)
- Kalilauge 1,25 %ig (Merck, Darmstadt, Art.Nr. 109918)
- Foss Tecator Water (Destilliertes Wasser, Foss, Hamburg)
- Aceton (Roth[®], Karlsruhe, Art.Nr. 5025.6)
- Trockenschrank (Heraeus, Hanau, Typ UT 20)
- Muffelofen (Nabertherm, Lilienthal, Typ Controller P 320)
- Exikkator aus Glas (VWR International GmbH, Wien)

Durchführung: Die Bestimmung des Rohfasergehalts erfolgte aus der Trockensubstanz. Es wurden die leeren Glasfiltertiegel gewogen und die Einwaage notiert. Anschließend wurde etwa 1 g des Probenmaterials eingewogen und etwa 0,2 g Celite als Filtrationshilfsmittel zugegeben.

Die Proben wurden im Fibertec hot extractor mit 1,25%iger Schwefelsäure 30 Minuten gekocht und anschließend zweimal mit destilliertem Wasser gespült. Danach folgte ein 30- minütiger Kochgang in 1,25%iger Kalilauge. Nach diesem wurde wieder zweimal mit heißem destilliertem Wasser gespült. Um ein Überkochen der Proben zu verhindern, wurden jeder Probe 1 bis 2 Tropfen Octanol zugegeben.

Nach den Kochvorgängen wurde das übriggebliebene Material in den Glasfiltertiegeln mit Aceton gewaschen und anschließend 1 h im Trockenschrank bei 103 °C getrocknet. Nach dem Abkühlen im Exikkator wurden sie gewogen und danach bei 520 °C im Muffelofen verascht.

Der Rohfasergehalt wurde aus der Differenz der Glasfiltertiegel mit der Trockensubstanz und dem Gewicht des Glasfiltertiegel nach der Veraschung abzüglich der Celiteinwaage berechnet.

$$\text{Rohfaser [\%]} = \text{Auswaage Trockensubstanz [g]} - \text{Auswaage Asche [g]} \cdot 100 \quad (3.6)$$

3.7.3 Rohasche

In der Rohasche sind Mineralstoffe und sonstige anorganische Substanzen enthalten. Für die Bestimmung wurden etwa 6 g der Ursprungssubstanz in zuvor gewogene Porzellantiegel eingewogen und im Muffelofen bei 550 °C über den Zeitraum von 24 h verascht. Durch anschließendes Wiegen wurde die Rohasche ermittelt und in Prozent der Ursprungssubstanz angegeben.

$$\text{Rohasche [\%]} = \frac{\text{Auswaage [g]} - \text{Gewicht Porzellantiegel [g]}}{\text{Einwaage [g]}} \cdot 100 \quad (3.7)$$

3.7.4 Rohprotein

Mit dem Rohprotein wird der gesamte Stickstoffgehalt des Futters ermittelt. Neben Proteinen sind auch stickstoffhaltige Verbindungen nichteiweißartiger Natur enthalten. Die Bestimmung erfolgte nach dem Kjeldahl-Verfahren. Um die Rohproteinmenge zu erhalten, muss das Ergebnis mit dem Faktor 6,25 multipliziert werden, da Protein einen mittleren Stickstoffgehalt von 16% enthält.

Geräte und Reagenzien:

- Foss KjeltectTM 2400 (Foss, Hamburg)
- Dispenser 0-25 ml (Foss, Hamburg)
- Schwefelsäure 98%ig (Merck, Darmstadt, Art.Nr. 100748)
- Natronlauge 21%ig (Merck, Darmstadt, Art.Nr. 105593)
- Natronlauge 32%ig (Merck, Darmstadt, Art.Nr. 105590)
- Salzsäure 0,2 n (Merck, Darmstadt, Art.Nr. 113134)
- Borsäurelösung 1%ig (Merck, Darmstadt, Art.Nr. 100160)
- Kjeldahl-Tabletten (Merck, Darmstadt, Art.Nr. 1.15348.1000)
- Foss Digestor 2020 (Foss, Hamburg)

Durchführung: Es wurden 0,5-1 g Futter in ein 250 ml Tube eingewogen, ein bis zwei Kjeldahl-Tabletten und 15 ml konz. H_2SO_4 mit dem Dispenser zugegeben. Anschließend wurden die Proben im Digestor bei 400°C etwa 1 h gekocht. Hierbei wurde der Stickstoff in Ammoniumsulfat überführt. Durch Zugabe von Natronlauge wurde Ammoniak freigesetzt, der in eine Vorlage aus Borsäure überdestilliert wurde. Mit Salzsäure konnte durch Titration der NH_4OH Gehalt bestimmt und somit die Stickstoffmenge erfasst werden. Die Umrechnung des prozentualen Rohproteingehalts erfolgte automatisch mit Hilfe des Foss KjeltectTM Gerätes.

3.7.5 Rohfett

Das Rohfett beinhaltet Stoffe, die in Petrolether löslich sind.

Geräte und Reagenzien:

- Soxlet-Hülsen (Foss, Hamburg)
- Filter (Foss, Hamburg)
- Celite 545 (Merck, Darmstadt, Art.Nr. 102693)
- Hot Plate 2022 Foss Tecator (Foss, Hamburg)
- SoxCap 2047 (Foss, Hamburg)
- Soxtec Avanti 2050 (Foss, Hamburg)
- Extraktionshülsen
- Siedesteinchen (VWR International GmbH, Wien)
- Petrolether ($40 - 60^\circ\text{C}$) (Roth[®], Karlsruhe, Art.Nr. CP44.3)
- Trockenschrank (Heraeus, Hanau, Typ UT 20)

Durchführung: In mit Filter bestückte Soxlet-Hülsen wurden je 1-2 g getrocknetes Futter eingewogen und etwas Celite zugegeben. Die Proben wurden 1 h in 0,33 n Salzsäure gekocht und anschließend mit Wasser gespült. Über Nacht wurden die Proben im Trockenschrank bei 103°C getrocknet. In jede Extraktionshülse wurden je 3 Siedesteinchen gegeben und das Gewicht notiert. Nun wurde der Soxletapparat mit

den Probegefäßen bestückt und die Extraktionshülsen mit 80 ml Petrolether gefüllt. Bei 135 °C wurde das Fett extrahiert. Im Anschluss wurden die Extraktionshülsen mit den Siedesteinchen und dem flüssigen Fett 1 h bei 103 °C im Trockenschrank getrocknet. Nachdem Abkühlen im Exikkator wurde das Gewicht erneut bestimmt und der Rohfettgehalt berechnet.

$$\text{Rohfett}[\% \text{ der TS}] = \frac{\text{Auswaage [g]} - (\text{Extraktionshülsen[g]} + \text{Siedesteinchen [g]})}{\text{Einwaage [g]}} \cdot 100 \quad (3.8)$$

3.8 Statistische Methoden

Die statistische Auswertung der Daten wurde mit Hilfe des Statistikprogramms SigmaStat, Version 3.0, durchgeführt. Die Ergebnisse der Analysen werden als Mittelwert (\bar{x}) mit der dazugehörigen Standardabweichung ($\pm\sigma$) angegeben.

3.8.1 Verlaufsuntersuchungen innerhalb einer Gruppe

Vergleiche innerhalb einer Gruppe zu verschiedenen Zeitpunkten, wie etwa die Entwicklung der Schlacht- und Filetgewichte, sowie die Iodkonzentrationen in den Fischfilets wurden mit dem t-test untersucht. Bestanden hierbei signifikante Unterschiede, so wurde p angegeben. p steht dabei für die Irrtumswahrscheinlichkeit und dient der Beschreibung des Signifikanzniveaus. Liegt z.B. $p < 0,05$, so liegt die Irrtumswahrscheinlichkeit unter 5%, es liegt ein signifikanter Unterschied zwischen den Werten zu den verschiedenen Zeitpunkten vor. Für die Kennzeichnung signifikanter Unterschiede innerhalb einer Gruppe zu verschiedenen Zeitpunkten werden die unten genannten Symbole verwendet. S1 steht dabei für die erste, S2 für die zweite Schlachtung.

★(p<0,05) ★★(p<0,01) ★★★(p<0,001) Zunahme von S1 zu S2
 ◇(p<0,05) ◇◇(p<0,01) ◇◇◇(p<0,001) Abnahme von S1 zu S2

3.8.2 Vergleichsuntersuchungen zwischen verschiedenen Gruppen

Die Untersuchung auf Unterschiede zwischen verschiedenen Gruppen erfolgte mit der Varianzanalyse. Sowohl die Iodgehalte der verschiedenen Fischgruppen als auch die Iodurinausscheidung der Gruppen aus dem Humanernährungsversuch wurden so auf statistische Unterschiede hin untersucht. Es wurden dabei die Gruppen untereinander verglichen. Je nachdem, ob die ermittelten Werte normalverteilt waren oder nicht, wurde die Holm-Sidak-Methode bzw. Dunn's-Methode angewandt. Statistisch signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Fischarten werden wie folgt gekennzeichnet:

$a(p < 0,05)$	$A(p < 0,01)$	$AA(p < 0,001)$	vs. Wilde Bachforellen
$b(p < 0,05)$	$B(p < 0,01)$	$BB(p < 0,001)$	vs. Kontrollfische
$c(p < 0,05)$	$C(p < 0,01)$	$CC(p < 0,001)$	vs. Regenbogenforellen
$d(p < 0,05)$	$D(p < 0,01)$	$DD(p < 0,001)$	vs. Bachforellen
$e(p < 0,05)$	$E(p < 0,01)$	$EE(p < 0,001)$	vs. Seeforellen
$f(p < 0,05)$	$F(p < 0,01)$	$FF(p < 0,001)$	vs. Seesaiblinge

Für die Kennzeichnung statistischer Unterschiede zwischen den verschiedene Gruppen des Räucher- und Humanernährungsversuchs werden unten stehende Buchstaben verwendet. KF steht dabei für Kontrollfische, IF für Iodfische, nSL für normale Salzlake und iSL für iodhaltige Salzlake.

$a(p < 0,05)$	$A(p < 0,01)$	$AA(p < 0,001)$	vs. KF nSL
$b(p < 0,05)$	$B(p < 0,01)$	$BB(p < 0,001)$	vs. KF iSL
$c(p < 0,05)$	$C(p < 0,01)$	$CC(p < 0,001)$	vs. IF nSL

Ergebnisse

In dem vorliegenden Feldfütterungsversuch wurden verschiedene Süßwasserfische mit einem kommerziellen Fischfutter, das mit 20 mg Iod/kg angereichert war, über sechs Monate gefüttert.

Nach 11 (S1) und 24 (S2) Wochen der Fütterung mit dem Iodfutter wurde von jeder Fischart eine unterschiedliche Anzahl von Tieren geschlachtet, die für die Iodanalyse, sowie für den Räucher- und Humanernährungsversuch verwendet wurden.

4.1 Schlachtgewichte

Nach dem Töten der Tiere wurde ihr Gesamtgewicht (Schlachtgewicht) bestimmt. Die mittleren Schlachtgewichte sowie die Anzahl der geschlachteten Zuchtfische und dem Wildfang (Bachforellen) sind in Tabelle 4.1 auf der nächsten Seite dargestellt. Die wilden Bachforellen hatten das geringste Schlachtgewicht.

Die Kontrollfische (Regenbogenforellen = RF) hatten in S1 ein mittleres Schlachtgewicht von 513,0 g \pm 68,1, das in S2 durchschnittlich bei 315,3 g \pm 62,5 lag. In dieser Gruppe kam es scheinbar zu einem Gewichtsverlust von rund 198 g, der höchst signifikant ($p < 0,001$) war und einer Abnahme von 38,5% entsprach.

Das Schlachtgewicht der Regenbogenforellen stieg in S2 im Vergleich zu S1 signifikant um 34% an.

Bei den Bachforellen war in S2 eine numerische mittlere Gewichtsabnahme von etwa 59 g zu verzeichnen, die aber keiner statistisch signifikanten Abnahme entsprach. In S1 lag das Schlachtgewicht dieser Fische höchst signifikant über dem der wilden Bachforellen, der Kontrollfische und dem der Seesaiblinge. Auch das Schlachtgewicht aus S2 lag hoch signifikant über dem der wilden Bachforellen.

Die Seeforellen wogen in S2 etwa 61% mehr als in S1, sie hatten eine signifikante Zunahme im Schlachtgewicht. In S2 lag ihr Schlachtgewicht hoch signifikant über dem der wilden Bachforellen und der Kontrollfische.

Das Schlachtgewicht der Seesaiblinge stieg von S1 zu S2 durchschnittlich um rund 81 g an, diese Zunahme war statistisch nicht signifikant.

Tabelle 4.1: Mittlere Schlachtgewichte aus der ersten (S1) und zweiten (S2) Schlachtung sowie dem Wildfang in [g] (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Schlachtung 1		Schlachtung 2	
	Anzahl	Gesamtgewicht $\bar{x} \pm \sigma$ [g]	Anzahl	Gesamtgewicht $\bar{x} \pm \sigma$ [g]
Wilde Bachforellen	$n = 3$	198,3 $\pm 46,5$		
Kontrolle (Regenbogenforellen)	$n = 24$	513,0 $\pm 68,1$	$n = 3$	315,3 $\pm 62,5$ $\diamond\diamond AA$
Regenbogenforellen	$n = 24$	624,9 $\pm 135,7$	$n = 3$	838,7 $\pm 62,3$ \star
Bachforellen	$n = 6$	945,0 $\pm 95,1$ $AABBBF$	$n = 3$	885,7 $\pm 63,4$ A
Seeforellen	$n = 3$	615,7 $\pm 113,7$	$n = 9$	989,6 $\pm 220,5$ $\star AB$
Seesaiblinge	$n = 3$	280,7 $\pm 85,2$	$n = 4$	361,5 $\pm 83,9$

\star (p<0,05) $\star\star$ (p<0,01) $\star\star\star$ (p<0,001) Zunahme von S1 zu S2

\diamond (p<0,05) $\diamond\diamond$ (p<0,01) $\diamond\diamond\diamond$ (p<0,001) Abnahme von S1 zu S2

a (p<0,05) A (p<0,01) AA (p<0,001) vs. Wilde Bachforellen

b (p<0,05) B (p<0,01) BB (p<0,001) vs. Kontrollfische

f (p<0,05) F (p<0,01) FF (p<0,001) vs. Seesaiblinge

4.2 Filetgewichte

Nach dem Filetieren und Enthäuten der Fische wurden die Filetgewichte bestimmt. Aus Tabelle 4.2 auf Seite 76 sind die mittleren Gewichte der Fischfilets aus beiden Schlachtungen, sowie dem Wildfang, zu entnehmen.

Die geringsten Filetgewichte hatten, analog zu den Schlachtgewichten, die wilden Bachforellen. Das durchschnittliche Gewicht lag mit rund 81,0 g höchst signifikant unter den Filetgewichten der Regenbogen-, Bach- und Seeforellen aus S1 und S2. Die Filets der Kontrollfische aus S1 wogen ebenfalls höchst signifikant mehr als die der wilden Bachforellen. Die Filets der Wildfische hatten einen Gewichtsanteil von rund 41% am Schlachtgewicht.

Bei den Kontrollfischen kam es in S2, wie bei den Schlachtgewichten, scheinbar zu einer Abnahme der Filetgewichte. Diese war hoch signifikant und betrug rund 42,4%. Der prozentuale Anteil der Filets am Gesamtgewicht lag in beiden Schlachtungen mit 43,2% (S1) und 45,4% (S2) in einem ähnlichen Bereich. Das durchschnittliche Filetgewicht der Kontrollfische lag in S1 signifikant unter dem der Regenbogen- und Bachforellen. In S2 war dieser Unterschied hoch bzw. höchst signifikant und zusätzlich gegenüber den Seeforellen nachweisbar.

Das mittlere Filetgewicht der Regenbogenforellen stieg in S2 signifikant um etwa 22% an. Die Filetgewichte aus S1 hatten einen prozentualen Anteil am Gesamtgewicht von 42,7%, in S2 lag er bei 46,1%.

Bei den Bachforellen blieb das mittlere Filetgewicht aus S1 und S2 konstant. Rund 35% des Gesamtgewichts entfielen in S1 auf die Filets, in S2 waren es 37,6%.

Die größte Zunahme der Filetgewichte zwischen beiden Schlachtungen hatten mit rund 188 g die Seeforellen. Sie war statistisch signifikant und entsprach einer Erhöhung von rund 65%. Die Filets aus S1 hatten einen Anteil von etwa 46,9% am Gesamtgewicht, in S2 waren es 48,3%. Das mittlere Filetgewicht aus S2 lag hoch bzw. höchst signifikant über dem der Bachforellen, Wild- und Kontrollfische, sowie dem der Seesaiblinge.

Die Filetgewichte der Seesaiblinge stiegen in S2 zwar numerisch um circa 37 g an,

diese Zunahme war jedoch nicht statistisch signifikant. Der prozentuale Anteil am Gesamtgewicht war mit 45,4% (S1) und etwa 46% (S2) annähernd gleich. Gegenüber den anderen Zuchtfischen lagen die Filetgewichte der Seesaiblinge in beiden Schlachtungen hoch bzw. höchst signifikant unter den anderen Filetgewichten. Lediglich zu den Kontrollfischen konnte in S2 kein statistischer Unterschied nachgewiesen werden.

4.3 Prozentualer Gewichtsanteil der verschiedenen Kompartimente

Neben den Filets wurden auch die Bestandteile Haut, Innereien, Kiemen, Restkörper und gegebenenfalls die Gonaden getrennt gewogen. Die prozentualen Anteile der verschiedenen Kompartimente am Gesamtgewicht aus S1 sind in Tabelle 4.3 auf Seite 77 dargestellt.

Die Filets der Fische hatten, wie bereits unter 4.2 beschrieben, einen prozentualen Anteil am Gesamtgewicht von 35-46,9%.

Die prozentuale Verteilung der Haut war bei den wilden Bachforellen mit rund 5,7% am geringsten und bei den Seeforellen mit 7,5% am höchsten. Bei den anderen Fischen lag er zwischen 6,1- und 6,7%.

Der Gewichtsanteil der Innereien lag zwischen 6,1 und 12,7%. Die Gonaden der geschlechtsreifen Bachforellen hatten einen Gewichtsanteil von rund 14,4% an der Gesamtmasse. Bei den anderen, nicht geschlechtsreifen Fischen, lag der Anteil mit 0,1 bis 3,3 % deutlich niedriger.

Bei allen Fischen machten die Kiemen 2,3-3% des Gesamtgewichts aus. Die Restkörper der Fische hatten einen prozentualen Anteil, der zwischen 31,6 und 41,1% lag.

Tabelle 4.2: Mittlere Filetgewichte aus der ersten (S1) und zweiten (S2) Schlachtung sowie dem Wildfang in [g] (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Schlachtung 1		Schlachtung 2	
	Anzahl	Filetgewichte $\bar{x} \pm \sigma$ [g]	Anzahl	Filetgewichte $\bar{x} \pm \sigma$ [g]
Wilde Bachforellen	$n = 3$	81,0 $\pm 18,0$		
Kontrolle (Regenbogenforellen)	$n = 4$	249,5 $\pm 26,6$ <i>AAF</i>	$n = 3$	143,7 $\pm 32,6$ $\diamond\diamond$
Regenbogenforellen	$n = 4$	317,8 $\pm 35,0$ <i>AAbFF</i>	$n = 3$	387,0 $\pm 34,4$ \star <i>AABBFF</i>
Bachforellen	$n = 6$	331,7 $\pm 54,4$ <i>AAbFF</i>	$n = 3$	334,3 $\pm 61,3$ <i>AABF</i>
Seeforellen	$n = 3$	289,7 $\pm 62,5$ <i>AAFF</i>	$n = 9$	478,0 $\pm 105,5$ \star <i>AABBDF</i>
Seesaiblinge	$n = 3$	128,7 $\pm 46,4$	$n = 4$	165,8 $\pm 36,7$

\star (p<0,05) $\star\star$ (p<0,01) $\star\star\star$ (p<0,001) Zunahme von S1 zu S2

\diamond (p<0,05) $\diamond\diamond$ (p<0,01) $\diamond\diamond\diamond$ (p<0,001) Abnahme von S1 zu S2

\overline{a} (p<0,05) \overline{A} (p<0,01) \overline{AA} (p<0,001) vs. Wilde Bachforellen

\overline{b} (p<0,05) \overline{B} (p<0,01) \overline{BB} (p<0,001) vs. Kontrollfische

\overline{c} (p<0,05) \overline{C} (p<0,01) \overline{CC} (p<0,001) vs. Regenbogenforellen

\overline{d} (p<0,05) \overline{D} (p<0,01) \overline{DD} (p<0,001) vs. Bachforellen

\overline{e} (p<0,05) \overline{E} (p<0,01) \overline{EE} (p<0,001) vs. Seeforellen

\overline{f} (p<0,05) \overline{F} (p<0,01) \overline{FF} (p<0,001) vs. Seesaiblinge

Tabelle 4.3: Mittlere prozentuale Gewichtsanteile der Kompartimente am Gesamtgewicht aus Schlachtung 1 in [%] (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Filet $\bar{x} \pm \sigma$ [%]	Haut $\bar{x} \pm \sigma$ [%]	Inne- reien $\bar{x} \pm \sigma$ [%]	Kie- men $\bar{x} \pm \sigma$ [%]	Rest- körper $\bar{x} \pm \sigma$ [%]	Gona- den $\bar{x} \pm \sigma$ [%]
Wilde Bachforellen $n = 3$	40,9 $\pm 2,7$	5,7 $\pm 1,0$	6,1 $\pm 1,1$	2,8 $\pm 0,4$	41,1 $\pm 2,7$	1,0 $\pm 0,5$
Kontrolle (Regenbo- genforellen) $n = 4$	43,2 $\pm 0,6$	6,6 $\pm 0,5$	12,7 $\pm 1,9$	3,0 $\pm 0,3$	33,5 $\pm 1,1$	0,1 $\pm 0,0$
Regenbogen- forellen $n = 4$	42,7 $\pm 2,6$	6,3 $\pm 1,2$	10,6 $\pm 0,9$	2,8 $\pm 0,1$	33,6 $\pm 0,8$	3,3 $\pm 4,1$
Bachforellen $n = 6$	35,0 $\pm 3,5$	6,7 $\pm 0,8$	8,8 $\pm 1,0$	2,4 $\pm 0,3$	31,6 $\pm 1,9$	14,4 $\pm 6,2$
Seeforellen $n = 3$	46,9 $\pm 2,7$	7,5 $\pm 0,4$	10,2 $\pm 0,4$	2,3 $\pm 0,1$	32,4 $\pm 2,1$	0,1 $\pm 0,1$
Seesaiblinge $n = 3$	45,4 $\pm 2,7$	6,2 $\pm 0,6$	9,0 $\pm 2,3$	2,5 $\pm 0,5$	35,3 $\pm 3,2$	1,3 $\pm 1,6$

Tabelle 4.4: Nährstoffgehalte der Fischfutter nach Weender Analyse in [%] (Trockensubstanz (TS), Rohprotein (Rpr), Rohfett (Rfe), Rohfaser (Rfa) und Rohasche (Ra)).

Futter	TS[%]	Rpr[%]	Rfe[%]	Rfa[%]	Ra[%]
Kontrollfutter	91,4	47,7	11,1	1,5	7,9
Iodfutter	94,0	43,4	13,0	2,1	7,4

4.4 Weender Analyse der Fischfutter

Von dem Kontroll- und Iodfutter wurden die Trockensubstanz (TS), die Rohprotein- (Rpr) und Fettgehalte (Rfe), sowie die Rohfaser- (Rfa) und Rohaschegehalte (Ra) bestimmt. Die Ergebnisse sind aus Tabelle 4.4 ersichtlich.

4.5 Iodkonzentration in den Fischfuttern

Die Iodanalyse der Fischfutter erfolgte nach dem katalytischen Verfahren nach Sandell und Kolthoff mit Hilfe der alkalischen Trockenveraschung (siehe 3.5.1 auf Seite 54). Die Probenentnahmen erfolgten zum Zeitpunkt der ersten (29.10.2007) und zweiten (28.01.2008) Schlachtung. Es wurde von jedem Futter an verschiedenen Stellen der Futtersäcke Proben entnommen und vor der Homogenisierung zu je einer Probe vermischt. Die Proben wurden jeweils im Doppelansatz bestimmt. Da die Iodkonzentration in den Iodfuttern über der des höchsten Standards lag, mussten hier Verdünnungsreihen angelegt werden.

Das Kontrollfutter von beiden Probenentnahmen hatte jeweils einen Iodgehalt von 1 mg/kg TS. Das Carotinfutter, welches den iodgefütterten Regenbogenforellen zu 20% zugefüttert wurde, enthielt 0,7 mg/kg TS.

Die Iodkonzentration des Iodfutters von der ersten Probenentnahme lag bei etwa 20 mg/kg TS, was der supplementierten Iodmenge entsprach. Bei der zweiten Probenentnahme wurde das Iodfutter aus beiden am Versuch beteiligten Betrieben entnommen und analysiert. In beiden Iodfuttern fanden sich 14,9 mg Iod/kg TS bzw. 15,7 mg Iod/kg TS. Es kam in den drei Monaten, die zwischen den beiden Probenentnahmen lagen, scheinbar zu einem Iodverlust von etwa 5 mg/kg TS.

Tabelle 4.5: Mittlere Iodkonzentration in den Fischfuttern zum Zeitpunkt der ersten (S1) und zweiten (S2) Probenentnahme in [mg/kg] TS (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Probe Oktober (S1)	Probe Januar (S2)	Betrieb
	Iod	Iod	
	$\bar{x} \pm \sigma$ [mg/kg] TS	$\bar{x} \pm \sigma$ [mg/kg] TS	
Kontrollfutter	1,0 \pm 0, 0	1,0 \pm 0, 4	1
Carotinfutter		0,7 \pm 0, 0	1
Iodfutter	20,2 \pm 3, 7	14,9 \pm 0, 7	1
Iodfutter		15,7 \pm 0, 9	2

4.6 Iodkonzentration in den Fischen

Die Iodanalyse in den verschiedenen Fischbestandteilen erfolgte analog zu den Fischfuttern nach dem katalytischen Verfahren nach Sandell und Kolthoff mit Hilfe der alkalischen Trockenveraschung (siehe 3.5.1). Es wurden jeweils Doppelansätze bestimmt. Lagen die gemessenen Iodkonzentrationen über der des höchsten Arbeitsstandards, so wurden die Proben erneut verascht und Verdünnungsreihen angelegt.

4.6.1 Iodkonzentrationen der Filets

Die zentrale Fragestellung der vorliegenden Arbeit war, ob unter Feldbedingungen durch eine Anreicherung des Fischfutters mit der maximal zulässigen Iodmenge in Form von Calciumiodat, eine Steigerung in der Iodkonzentration der Filets erzielt werden kann. Ein weiterer wichtiger Aspekt stellte der Vergleich des Iodgehalts von in Bayern wildlebenden Fischen mit Tieren aus den Fischzuchten dar.

4.6.1.1 Filets der wilden Bachforellen

Aus der Oberrach, einem Zufluss des Walchensees, wurden drei wildlebende Bachforellen gefangen, um den Iodgehalt von in Bayern freilebenden Fischen mit solchen aus

Tabelle 4.6: Mittlere Iodkonzentration in den Filets der wilden Bachforellen in [$\mu\text{g}/\text{kg}$] Frischsubstanz (FS); $n = 3$

Fisch	Iod \bar{x} [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS
1	20,0
2	18,8
3	16,9
Mittelwert $\pm\sigma$	18,6 \pm1,5

Aquakulturen vergleichen zu können. Die Iodkonzentration der Filets dieser Fische ist in Tabelle 4.6 aufgeführt.

Verglichen mit den Iodkonzentrationen in den Filets der Zuchtfische (siehe Tabelle 4.7 auf Seite 82 und 4.8 auf Seite 84), hatten die wilden Bachforellen eine deutlich geringere Iodkonzentration.

Am geringsten war der Unterschied zu den Kontrollfischen. Diese hatten gegenüber den wilden Bachforellen in S1 die 2,3-, in S2 die 3-fache Iodkonzentration im Filet. Die iodgefütterten Regenbogenforellen wiesen in den Filets aus S1 die 3,7-fache, in denen aus S2 die 4,3-fache Iodkonzentration der wilden Bachforellen auf. In S2 lag ihre Iodkonzentration damit hoch signifikant über der von den wilden Bachforellen. Die Filets der iodgefütterten Bachforellen hatten in S1 die 4,1-fache, in S2 die 5,3-fache Iodkonzentration der wilden Bachforellen. In S2 lag die Iodkonzentration in den Filets der iodgefütterten Fische höchst signifikant über der von den Wildfischen. Die Seeforellen hatten mit dem 7,1-(S1) bzw. 5,1-fachen (S2) ebenfalls höchst signifikant ($p < 0,001$) mehr Iod im Filet als die wilden Bachforellen.

Den größten Unterschied gab es im Vergleich zu den Seesaiblingen. Diese Fische hatten in S1 die 9,9-, in S2 die 10,3-fache Iodkonzentration in ihren Filets. In beiden Schlachtungen lag die Iodkonzentration damit höchst signifikant über der von den wilden Bachforellen.

4.6.1.2 Filets aus Schlachtung 1

Bei den Filets der ersten Schlachtung wurde zusätzlich untersucht, ob die Iodkonzentration innerhalb der Filets an verschiedenen Stellen unterschiedlich war. Zu diesem Zweck wurde an drei Stellen der Filets je eine Probe von circa 5 g entnommen, homogenisiert und im Doppelansatz analysiert. Die Entnahmestellen sind der Abbildung 3.1 auf Seite 49 zu entnehmen. Die Mittelwerte aus den einzelnen Probeentnahmestellen, sowie der gemittelte Iodgehalt der Filets sind in der Tabelle 4.7 auf der nächsten Seite dargestellt.

Bei keiner Fischgruppe konnte dabei ein signifikanter Unterschied im Iodgehalt zwischen den verschiedenen Probenentnahmestellen festgestellt werden, weshalb im Folgenden mit den Mittelwerten gerechnet wurde.

Auffällig ist die zum Teil recht hohe Standardabweichung, besonders in der Gruppe der Seesaiblinge, da ein Seesaibling, verglichen mit den beiden anderen, einen relativ niedrigen Iodgehalt aufwies. In der Literatur wird ebenfalls von großen Unterschieden im Iodgehalt innerhalb einer Fischart berichtet, weshalb dieser Fisch nicht als Extremwert behandelt wurde. So fanden zum Beispiel Karl et al. (2001) Iodgehalte in Filets beim Kabeljau, die innerhalb eines Fangplatzes zwischen 554- und 941 μg Iod/100g FS, und zwischen 29- und 1124 μg Iod/100g FS in verschiedenen Fanggebieten variierten.

Die Kontrollfische aus S1 hatten im Mittel eine höchst signifikant niedrigere Iodkonzentration im Filet als die Seeforellen und Seesaiblinge. Sie lag gegenüber den Seeforellen etwa 3,1-, gegenüber den Seesaiblingen 4,4-fach niedriger.

Die Regenbogen- und Bachforellen hatten ähnliche Iodkonzentrationen in ihren Filets, wobei die Bachforellen eine um 6,9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ FS höhere Konzentration hatten. Im Verhältnis zu den Kontrollfischen lagen ihre Konzentrationen rund 1,6-(RF) bzw. 1,8-fach (BF) höher, was statistisch nicht signifikant war.

Tabelle 4.7: Mittlere Iodkonzentration an drei Probenentnahmestellen der Filets aus Schlachtung 1 (S1) in [$\mu\text{g}/\text{kg}$] Frischsubstanz (FS), sowie Mittelwerte der drei Stellen (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Vorne	Mitte	Hinten	Mittelwert gesamt
	$\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS	$\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS	$\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS	$\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS
Kontrolle (Regenbo- genforellen) $n = 3$	42,2 $\pm 15,1$	43,2 $\pm 20,8$	41,1 $\pm 27,5$	42,1 $\pm 21,1$
Regenbogen- forellen $n = 3$	77,5 $\pm 38,3$	67,0 $\pm 15,4$	63,6 $\pm 19,6$	69,3 $\pm 24,4$
Bachforellen $n = 6$	74,8 $\pm 26,1$	77,1 $\pm 41,9$	76,7 $\pm 27,7$	76,2 $\pm 31,9$
Seeforellen $n = 3$	136,3 $\pm 44,3$	145,0 $\pm 27,8$	115,7 $\pm 33,0$	132,3 $\pm 35,0$ <i>AABB</i>
Seesaiblinge $n = 3$	218,2 $\pm 102,4$	149,3 $\pm 83,5$	184,9 $\pm 94,3$	184,1 $\pm 93,4$ <i>AABB</i>

^a($p < 0,05$) ^A($p < 0,01$) ^{AA}($p < 0,001$) vs. Wilde Bachforellen

^b($p < 0,05$) ^B($p < 0,01$) ^{BB}($p < 0,001$) vs. Kontrollfische

4.6.1.3 Filets aus Schlachtung 2

In S2 erfolgte die Iodbestimmung aus der jeweils rechten, homogenisierten Filethälfte von je drei Fischen einer Gruppe. Bei den Seeforellen standen 9 Tiere zur Verfügung. Von ihren Filets wurde je eine Probe von circa 5-10 g aus dem vorderen Stück entnommen. Diese wurde homogenisiert und im Doppelansatz bestimmt. Die mittleren Iodgehalte der Filets aus S2 sind der Tabelle 4.8 auf der nächsten Seite zu entnehmen. Alle iodgefütterten Fische aus S2 hatten höchst signifikant mehr Iod in ihren Filets als die wilden Bachforellen.

Der größte Anstieg der Filetiodykonzentration von S1 zu S2 konnte bei den Kontrollfischen beobachtet werden. Bei dieser Gruppe kam es zu einer 1,3-fachen Erhöhung der Iodkonzentration. Wie bereits unter 4.1 auf Seite 72 erwähnt, kam es bei dieser Gruppe in S2 scheinbar zu einer höchst signifikanten Gewichtsabnahme. Da im Zeitraum von der ersten bis zur zweiten Schlachtung versehentlichlicherweise ein Großteil der Kontrollfische verkauft wurde, mussten für die zweite Schlachtung Kontrollfische jüngeren Alters abgefischt werden. Dabei kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass es hierbei zu einer Verwechslung der Fische gekommen ist. Aus diesem Grund wurde für die statistische Auswertung die Iodkonzentration der Kontrollfische aus S1 verwendet.

Die Regenbogenforellen hatten in S2 im Mittel einen rund 1,2-fach höheren Iodgehalt in den Filets als in S1.

Von den iodgefütterten Fischen hatten die Bachforellen die größte Steigerung in der Iodkonzentration. Zwischen den beiden Schlachtungen kam es bei ihnen zu einer Erhöhung von rund 29%.

Die Seesaiblinge hatten mit einem Mehrgehalt von etwa 4% nur eine geringe Iodzunahme.

Zu einer scheinbaren Abnahme der Iodkonzentration kam es bei den Seeforellen, sie betrug 28% und war statistisch signifikant.

Tabelle 4.8: Mittlere Iodkonzentration der Filets aus Schlachtung 2 in [$\mu\text{g}/\text{kg}$] Frischsubstanz (FS) (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Schlachtung 2 $\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS
Wilde Bachforellen $n = 3$	18,6 $\pm 1,5$
Kontrolle (Regenbogenforellen) $n = 3$	55,7 $\pm 7,4$ bzw. 42,1 $\pm 21,1$ (S1)
Regenbogenforellen $n = 3$	80,5 $\pm 49,5$ ^{AB}
Bachforellen $n = 3$	98,5 $\pm 25,1$ ^{AAB}
Seeforellen $n = 9$	94,8 $\pm 22,3$ ^{◊AABB}
Seesaiblinge $n = 3$	191,6 $\pm 29,6$ ^{AABBCCDDEE}

\diamond ($p < 0,05$) $\diamond\diamond$ ($p < 0,01$) $\diamond\diamond\diamond$ ($p < 0,001$) Abnahme von S1 zu S2

^a($p < 0,05$) ^A($p < 0,01$) ^{AA}($p < 0,001$) vs. Wilde Bachforellen

^b($p < 0,05$) ^B($p < 0,01$) ^{BB}($p < 0,001$) vs. Kontrollfische (S1)

^c($p < 0,05$) ^C($p < 0,01$) ^{CC}($p < 0,001$) vs. Regenbogenforellen

^d($p < 0,05$) ^D($p < 0,01$) ^{DD}($p < 0,001$) vs. Bachforellen

^e($p < 0,05$) ^E($p < 0,01$) ^{EE}($p < 0,001$) vs. Seeforellen

4.6.2 Iodkonzentrationen in den verschiedenen Kompartimenten

Um eine Aussage über die Iodverteilung innerhalb der Fische machen zu können, wurde die Iodkonzentration der verschiedenen Kompartimente bestimmt. Hierfür wurden die Fische aus S1 sowie die wildlebenden Bachforellen verwendet. Aus jeder Gruppe wurden von je drei Fischen alle Körperbestandteile analysiert.

Die Bachforellen standen bei der ersten Schlachtung kurz vor dem Ablachen, weshalb die Gonaden dieser Tiere voll ausgebildet waren und ebenfalls für die Iodanalyse zur Verfügung standen. Von dieser Gruppe wurden sechs Fische untersucht, davon waren fünf weiblich und einer männlich.

Die mittleren Iodgehalte der einzelnen Kompartimente sind in den Tabellen 4.9, 4.10 und 4.11 auf Seite 87 dargestellt.

4.6.2.1 Haut

Die Haut hatte bei allen Fischgruppen eine höhere Iodkonzentration als die Filets. Bei den wilden Bach- und den Regenbogenforellen war sie etwa doppelt, bei den Seeforellen rund 2,8-fach höher. Die Bachforellen und Seesaiblinge hatten eine 3,5-, die Kontrollfische eine 5,4-fach höhere Iodkonzentration in der Haut als in ihren Filets.

4.6.2.2 Innereien

Eine noch höhere Iodkonzentration als die Filets und die Haut hatten die Innereien. Bei den wildlebenden Bachforellen war dieser Unterschied mit der rund 2,3-fachen Konzentration der Filets am geringsten und lag in ähnlichem Bereich wie die Iodkonzentration der Haut. Die Innereien der Seesaiblinge hatten eine rund 4,6-fach höhere Iodkonzentration als ihre Filets. Bei den See- und Regenbogenforellen lag die Konzentration mit dem 5,2- bzw. 5,6-fachen sogar noch höher und erreichte mit dem 11,4-fachen bei den Kontrollfischen den größten Unterschied.

4.6.2.3 Restkörper

Die Restkörper der Zuchtfische hatten eine ähnliche oder geringere Iodkonzentration als die Haut. Bei den Regenbogenforellen war sie annähernd gleich. Etwa 80 bzw. 84% des Hautiodgehalts betrug sie bei den Bach- und Seeforellen bzw. den Kontrollfischen. Rund 71% der Hautiodkonzentration war es bei den Seesaiblingen. Lediglich die wilden Bachforellen hatten 11,3 % mehr Iod im Restkörper als in der Haut.

4.6.2.4 Kiemen

In den Kiemen der Fische wurde eine vergleichsweise sehr hohe Iodkonzentration gefunden. Sie lag bei allen Fischen deutlich über den Konzentrationen der anderen Kompartimente. Auffällig war die zum Teil recht hohe Streuung, was durch die Inhomogenität des Probenmaterials und durch starke individuelle Unterschiede bedingt sein könnte.

Die Kiemen der wilden Bachforellen hatten eine etwa 174-fach höhere Iodkonzentration als die Filets. Rund 127-fach höher lag sie bei den Bachforellen.

Mit im Durchschnitt über 10.000 μg Iod/kg FS war die Iodkonzentration in den Kiemen der Seeforellen am höchsten, allerdings war bei dieser Gruppe die Streuung sehr hoch, was durch den recht hohen Maximalwert von über 18.000 μg /kg FS verursacht wird. Im Vergleich zu den Filets der Seeforellen lag die Konzentration in den Kiemen etwa 81-fach höher. Die Kontrollfische lagen mit der 79-fachen Iodkonzentration in den Kiemen in einem ähnlichen Bereich. Etwas niedriger mit der 31- bzw. 21-fachen Iodkonzentration der Filets lag sie bei den Regenbogenforellen und Seesaiblingen.

4.6.2.5 Gonaden

In den Gonaden der weiblichen Bachforellen war eine relativ hohe Iodkonzentration von knapp 3390 μg Iod/kg FS ($\pm 869,4$) enthalten. Sie lag damit rund 44,5-fach über der Filetioidkonzentration. Die Gonaden des männlichen Tieres hatte eine 13-fach niedrigere Iodkonzentration als die der weiblichen Tiere. Sie lag mit 259 μg Iod/kg FS rund 3,4-fach höher als in den Filets und damit in einem ähnlichen Bereich wie die Iodkonzentration der Haut.

4.6.3 Absolute Iodmenge und prozentuale Iodverteilung der Kompartimente

Um die prozentuale Iodverteilung auf die Kompartimente zu erhalten, wurden zunächst die Iodkonzentrationen der einzelnen Kompartimente mit ihrem Gewicht multipliziert. Aus den so erhaltenen absoluten Iodmengen der einzelnen Bestandteile wurde die gesamte im Fisch vorhandene Iodmenge bestimmt. Anschließend wurde hieraus der prozentuale Anteil der Kompartimente an der absoluten Gesamtiodmenge errechnet. Aus den Einzelwerten wurden für jede Fischgruppe die Mittelwerte und die Standardabweichung bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.12 und 4.13 auf Seite 90 aufgeführt.

Tabelle 4.9: Mittlere Iodkonzentration der Haut und Innereien in [$\mu\text{g}/\text{kg}$] Frischsubstanz (FS) (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Haut $\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS	Innereien $\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS
Wilde Bachforellen $n = 3$	37,9 $\pm 19,6$	42,0 $\pm 11,1$
Kontrolle (Regenbogenforellen) $n = 3$	225,8 $\pm 115,8$	479,0 $\pm 147,8$ ^{AA}
Regenbogenforellen $n = 3$	147,1 $\pm 68,9$	390,0 $\pm 117,8$ ^A
Bachforellen $n = 6$	264,5 $\pm 28,7$	467,9 $\pm 89,1$ ^{AA}
Seeforellen $n = 3$	370,6 $\pm 106,0$ ^a	681,6 $\pm 34,5$ ^{AAcd}
Seesaiblinge $n = 3$	638,6 $\pm 397,5$	839,2 $\pm 292,7$ ^{AABCCD}

Tabelle 4.10: Mittlere Iodkonzentration der Restkörper und Kiemen in [$\mu\text{g}/\text{kg}$] Frischsubstanz (FS) (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Restkörper $\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS	Kiemen $\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS
Wilde Bachforellen $n = 3$	42,2 $\pm 14,6$	3232,7 $\pm 689,8$
Kontrolle (Regenbogenforellen) $n = 3$	189,9 $\pm 55,0$	3325,3 $\pm 1166,4$
Regenbogenforellen $n = 3$	138,0 $\pm 47,5$	2144,7 $\pm 254,6$
Bachforellen $n = 6$	212,5 $\pm 59,5$	9646,4 $\pm 2640,8$ ^C
Seeforellen $n = 3$	298,3 $\pm 59,3$ ^a	10769,2 $\pm 6347,8$
Seesaiblinge $n = 3$	453,8 $\pm 269,5$	3810,2 $\pm 1042,6$

^a($p < 0,05$) ^A($p < 0,01$) ^{AA}($p < 0,001$) vs. Wilde Bachforellen

^b($p < 0,05$) ^B($p < 0,01$) ^{BB}($p < 0,001$) vs. Kontrollfische

^c($p < 0,05$) ^C($p < 0,01$) ^{CC}($p < 0,001$) vs. Regenbogenforellen

^d($p < 0,05$) ^D($p < 0,01$) ^{DD}($p < 0,001$) vs. Bachforellen

^e($p < 0,05$) ^E($p < 0,01$) ^{EE}($p < 0,001$) vs. Seeforellen

Tabelle 4.11: Mittlere Iodkonzentration der Gonaden in [$\mu\text{g}/\text{kg}$] Frischsubstanz (FS) (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Gonaden weiblich $n = 5$ $\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS	Gonaden männlich $n = 1$ $\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS
Bachforellen $n = 6$	3389,9 $\pm 869,4$	259,0 $\pm 28,4$

4.6.3.1 Absolute Iodmengen

Die Kiemen enthielten bei allen Fischen, außer bei den Seesaiblingen und Bachforellen, die absolut höchsten Iodmengen. Die Seesaiblinge wiesen im Filet $3,2 \mu\text{g}$ und in den Restkörpern $18,5 \mu\text{g}$ mehr Iod auf als in den Kiemen. Die geschlechtsreifen Bachforellen hatten die absolut höchste Iodmenge in den Gonaden, die mit $441,6 \mu\text{g}$ knapp doppelt so hoch wie in den Kiemen und rund 17-fach höher als im Filet der Tiere war.

Die Kiemen der wilden Bachforellen hatten die knapp 13-fache Iodmenge als die Filets. Bei den Regenbogenforellen lag das Verhältnis mit dem 1,8-fachen am niedrigsten. Die Seeforellen, Kontrollfische und Bachforellen lagen mit der 3,5- bis 8,5-fachen Iodmenge der Filets dazwischen.

Die Restkörper der Fische hatten bei allen Fischen, außer den Seesaiblingen und Bachforellen, die zweithöchsten absoluten Iodmengen.

Die absoluten Iodmengen in den Innereien der Fische lag bei den Seeforellen ungefähr gleich wie in den Filets. Bei den wilden Bachforellen und Seesaiblingen lag sie etwas niedriger als in den Filets. Die anderen Fische hatten mehr Iod in den Innereien als in ihren Filets.

In der Haut war bei allen Fischen die geringste Iodmenge enthalten.

4.6.3.2 Prozentuale Iodverteilung

Die Ergebnisse der absoluten Iodmengen lassen auch auf die prozentuale Iodverteilung in den verschiedenen Bestandteilen schließen.

In der Haut der Tiere waren zwischen 1,8 und 7,5 % des Iods enthalten.

In den Filets der Fische schwankte der prozentuale Iodanteil zwischen 3,4 % bei den geschlechtsreifen Bachforellen und 20,1 % bei den Seesaiblingen. Die Kontrollfische enthielten 7% des Gesamtiods in den Filets. Bei den Regenbogenforellen waren 16,8% des Iods auf die Filets verteilt. Gegenüber den Kontrollfischen lag der prozentuale Iodanteil im Filet der Regenbogenforellen damit um das 2,4-fache höher. Bei den wilden Bachforellen waren 6,5% und bei den Seeforellen 13,5% des Gesamtiods in den Filets enthalten.

Bemerkenswert war die sehr hohe Iodmenge in den Gonaden der Bachforellen, die rund 51 % des gesamten Iods beinhalteten. Vernachlässigt man den Iodgehalt in den Gonaden, so haben die Filets, die Kiemen und die Restkörper der Bachforellen ähnliche Iodverteilungen wie die wilden Bachforellen. Prozentual mehr Iod ist allerdings in der Haut und den Innereien enthalten. Bei dieser Betrachtungsweise würden diese Anteile im Falle der Haut in ähnlichen Bereichen wie bei den Regenbogenforellen, Seeforellen und Kontrollfische liegen. Die Innereien hätten ähnliche prozentuale Anteile wie bei den Seeforellen und Saiblingen.

Neben den Gonaden war in den Kiemen der prozentual höchste Iodanteil vorhanden. Mit rund 74% des Gesamtiods nahm er bei den wilden Bachforellen den höchsten Wert an. Etwa 47% des Iods waren bei den See- und zwischen 34-39 % bei den Regenbogenforellen und Kontrollfischen in diesen Organen enthalten. Die Seesaiblinge hatten mit knapp 25% einen niedrigeren Anteil.

4.7 Räucherversuch

In einem Räucherversuch sollte geklärt werden, welchen Einfluss das Einlegen in verschiedene Salzlaken vor dem eigentlichen Räucherungsprozess hat. Von Interesse war besonders die Frage, ob durch die Verwendung einer iodhaltigen Salzlake ähnliche Iodkonzentrationen in den Filets erzielt werden können, wie durch die Iodfütterung. Anschließend sollte in einem Humanernährungsversuch geklärt werden, ob es durch den Verzehr der unterschiedlich behandelten Fischfilets zu unterschiedlichen Iodversorgungen im Menschen kommt.

Es wurden hierfür jeweils 10 mit Iod- und Kontrollfutter gefütterte Regenbogenforellen vor dem Räuchern für 15 Stunden in eine iodsalzhaltige Lake eingelegt. Von beiden Gruppen wurden zusätzlich je 10 Fische in eine normale Kochsalzlösung ohne Iodzusatz eingelegt. Die Tiere stammten aus S1 nach 11-wöchiger Fütterung. Nachdem Räuchern wurden die Fische filetiert, enthäutet, gewogen, vakuumverpackt und bis zur Iodanalyse bzw. zum Humanernährungsversuch tiefgefroren. Für die Iodana-

Tabelle 4.12: Absolute Iodmenge in den verschiedenen Kompartimenten in [μg] (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Filet	Haut	Inne- reien	Kie- men	Rest- körper	Gona- den
Wilde Bachforellen <i>n</i> = 3	1,5 $\pm 0,5$	0,4 $\pm 0,1$	0,5 $\pm 0,1$	18,9 $\pm 9,3$	3,3 $\pm 0,9$	
Kontrollfische (Regenbogen- forellen) <i>n</i> = 3	10,7 $\pm 4,4$	9,0 $\pm 4,8$	36,0 $\pm 17,0$	61,7 $\pm 35,5$	37,4 $\pm 14,0^a$	
Regenbogenfo- rellen <i>n</i> = 3	23,9 $\pm 13,3$	6,6 $\pm 2,8$	29,5 $\pm 10,1$	43,8 $\pm 10,0$	32,1 $\pm 9,4$	
Bachforellen <i>n</i> = 6	25,7 $\pm 11,1^a$	16,2 $\pm 1,9^a$	39,6 $\pm 12,2$	218,7 $\pm 59,8$ <i>AABBCC</i> <i>eFF</i>	63,5 $\pm 18,2$ <i>AAc</i>	441,6 $\pm 240,4$
Seeforellen <i>n</i> = 3	41,1 $\pm 21,8$ <i>Ab</i>	17,3 $\pm 7,3^a$	42,9 $\pm 8,8$	143,0 $\pm 63,9$ <i>AbcF</i>	60,8 $\pm 23,8^A$	
Seesaiblinge <i>n</i> = 3	30,8 $\pm 23,8^a$	12,2 $\pm 10,3$	23,6 $\pm 16,1$	27,6 $\pm 12,4$	46,1 $\pm 32,1^a$	

Tabelle 4.13: Prozentualer Iodanteil der verschiedenen Kompartimente am Gesamtiodgehalt in [%] (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$)

	Filet	Haut	Inne- reien	Kie- men	Rest- körper	Gona- den
Wilde Bachforellen <i>n</i> = 3	6,5 $\pm 2,1$	1,8 $\pm 1,0$	2,2 $\pm 1,1$	74,4 $\pm 12,1$ <i>bCDF</i>	15,1 $\pm 8,0$	
Kontrollfische (Regenbogen- forellen) <i>n</i> = 3	7,0 $\pm 1,4$	5,8 $\pm 2,2^{ad}$	23,6 $\pm 7,8$ <i>AADD_ef</i>	39,4 $\pm 11,4$	24,3 $\pm 0,4^D$	
Regenbogenfo- rellen <i>n</i> = 3	16,8 $\pm 5,7$	4,8 $\pm 1,4$	21,4 $\pm 3,9$ <i>AADD_e</i>	33,6 $\pm 12,5$	23,5 $\pm 4,5^D$	
Bachforellen <i>n</i> = 6	3,4 $\pm 2,1$	2,3 $\pm 0,9$	5,2 $\pm 2,0$	30,6 $\pm 18,3$	8,3 $\pm 3,0$	50,6 $\pm 24,9$
Seeforellen <i>n</i> = 3	13,5 $\pm 6,2$	5,7 $\pm 2,1^{ad}$	14,3 $\pm 3,1^{AD}$	46,7 $\pm 16,9$	19,8 $\pm 6,0^d$	
Seesaiblinge <i>n</i> = 3	20,1 $\pm 4,4^D$	7,5 $\pm 3,4^{AD}$	15,8 $\pm 4,6^{AD}$	24,9 $\pm 20,2$	30,5 $\pm 11,2$ <i>ADD_e</i>	

^a($p < 0,05$) ^A($p < 0,01$) ^{AA}($p < 0,001$) vs. Wilde Bachforellen^b($p < 0,05$) ^B($p < 0,01$) ^{BB}($p < 0,001$) vs. Kontrollfische^c($p < 0,05$) ^C($p < 0,01$) ^{CC}($p < 0,001$) vs. Regenbogenforellen^d($p < 0,05$) ^D($p < 0,01$) ^{DD}($p < 0,001$) vs. Bachforellen^e($p < 0,05$) ^E($p < 0,01$) ^{EE}($p < 0,001$) vs. Seeforellen^f($p < 0,05$) ^F($p < 0,01$) ^{FF}($p < 0,001$) vs. Seesaiblinge

Tabelle 4.14: Verwendete Abkürzungen der geräucherten Regenbogenforellen und der verschiedenen Salzlaken

KF:	Kontrollfische
IF:	Iodfische
nSL:	normale Salzlake
iSL:	iodhaltige Salzlake

lyse dieser Filets wurde vom vorderen Filetstück eine Probenmenge von etwa 5 g entnommen und homogenisiert. Mit Hilfe der alkalischen Trockenveraschung nach Sandell und Kolthoff (siehe 3.5.1) erfolgte die Iodanalyse der einzelnen Bestandteile. Im Folgenden werden für die verschiedenen Gruppen die Abkürzungen aus Tabelle 4.14 verwendet.

4.7.1 Iodkonzentration in den geräucherten Filets

Durch das Einlegen der Kontrollfische in iodhaltige Salzlake stieg die Iodkonzentration in den Filets durchschnittlich um etwa $216 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS an, was aus der Tabelle 4.15 auf Seite 93 zu entnehmen ist. Die KF iSL hatten eine 4,6-fach höhere Iodkonzentration in den Filets als die KF aus nSL, dieser Unterschied war höchst signifikant.

Auch bei den Iodfischen konnte, wie in Tabelle 4.16 auf Seite 93 dargestellt, durch das Einlegen in iSL eine Erhöhung der Iodkonzentration von rund $262 \mu\text{g}$ Iod/kg FS, verglichen mit den Filets von IF aus nSL, erzielt werden. Die Filets aus iSL hatten damit etwa die 3,3-fache Iodkonzentration im Vergleich zu den Filets aus nSL. Dies war eine höchst signifikante Erhöhung der Konzentration.

Die IF aus iSL hatten gegenüber den KF aus iSL einen um etwa $101 \mu\text{g}$ Iod/kg FS höheren Iodgehalt im Filet, was etwa dem 1,3-fachen entsprach und statistisch nicht signifikant war.

Eine etwa doppelt so hohe Iodkonzentration wie die KF nSL hatten die IF nSL, sie hatten im Mittel $55 \mu\text{g}$ Iod/kg FS mehr Iod.

Auch höchst signifikant größer war die Iodkonzentration der IF iSL gegenüber den

KF nSL. IF iSL hatten eine durchschnittlich höhere Konzentration von $317 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS im Filet, was rund 6,3-fach über der Konzentration von den KF aus nSL lag.

4.7.2 Iodkonzentration in der Haut der Räucherfische

Die Iodkonzentrationen der geräucherten Fischhäute sind der Tabelle 4.17 auf Seite 94 zu entnehmen. Sie waren, analog zu den Filets, bei den beiden Gruppen aus iodhaltiger Salzlake am höchsten. Beide Gruppen aus iSL hatten eine etwa doppelt so hohe Iodkonzentration in der Haut als die Tiere aus den nSL. Signifikant mehr Iod in der Haut hatten die IF aus iSL gegenüber den KF aus nSL, der mittlere Unterschied betrug knapp $390 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS.

Im Vergleich zur Iodkonzentration in den geräucherten Filets hatten alle Gruppen eine höhere Iodkonzentration in der Haut. Bei den Kontrollfischen aus nSL war der Unterschied mit dem 3,5-fachen des Filetgehalts am größten. Die Iodfische aus nSL hatten den 2,5-fachen Gehalt in der Haut. Die in iodhaltige Lake eingelegten Fische hatten in der Haut die 1,5 (KF)- bzw. 1,6 (IF)-fache Iodkonzentration der Filets.

4.7.3 Iodkonzentration in den Restkörpern der Räucherfische

Die höchsten Iodkonzentrationen der Restkörper waren, wie schon bei den Filets und der Haut, bei den Gruppen aus der Iodlake zu verzeichnen. Die Mittelwerte der verschiedenen Gruppen sind in Tabelle 4.18 auf Seite 94 aufgeführt. Bei den KF lag die Iodkonzentration in den Restkörpern um das rund 3,2-, bei den IF etwa das 3-fache über der Konzentration von den Fischen aus normaler Salzlake. Diese Unterschiede waren höchst signifikant. Eine ebenso höchst signifikante, im Mittel um $203 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS höhere Iodkonzentration hatten die IF iSL in ihren Restkörpern gegenüber den der KF iSL.

Verglichen mit der Iodkonzentration in den Filets hatten die Restkörper der KF nSL die 2,9-fache, die anderen Fische etwa die doppelte Iodmenge in diesem Bestandteil.

Tabelle 4.15: Iodkonzentration in den geräucherten Filets der Regenbogenforellen: Kontrollfische in [$\mu\text{g}/\text{kg}$] Frischsubstanz (FS)

Fisch Nr.	Iod [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS	Fisch Nr.	Iod [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS
1	63,7	1	279,8
2	91,6	2	385,7
3	69,4	3	178,2
4	73,2	4	313,0
5	35,8	5	269,1
6	66,1	6	319,0
7	78,6	7	253,7
8	44,3	8	326,7
9	35,1	9	160,8
10	44,5		
Mittelwert $\pm\sigma$	60,3 \pm19,3	Mittelwert $\pm\sigma$	276,2 \pm71,8 ^{AA}

a) normale Salzlake $n = 10$ b) iodhaltige Salzlake $n = 9$ Tabelle 4.16: Iodkonzentration in den geräucherten Filets der Regenbogenforellen: Iodfische in [$\mu\text{g}/\text{kg}$] Frischsubstanz (FS)

Fisch Nr.	Iod [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS	Fisch Nr.	Iod [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS
1	91,3	1	315,2
2	92,0	2	456,4
3	87,8	3	401,0
4	84,3	4	432,0
5	218,7	5	315,5
6	83,6	6	335,1
7	106,6	7	433,8
8	117,3	8	350,0
9	149,7	9	341,6
10	123,7	10	392,0
Mittelwert $\pm\sigma$	115,5 \pm42,0	Mittelwert $\pm\sigma$	377,3 \pm52,4 ^{AACC}

a) normale Salzlake $n = 10$ b) iodhaltige Salzlake $n = 10$

^a ($p < 0,05$) ^A ($p < 0,01$) ^{AA} ($p < 0,001$) vs. KF nSL
^b ($p < 0,01$) ^B ($p < 0,01$) ^{BB} ($p < 0,001$) vs. KF iSL
^c ($p < 0,05$) ^C ($p < 0,01$) ^{CC} ($p < 0,001$) vs. IF nSL

Tabelle 4.17: Mittlere Iodkonzentrationen in der Haut der Räucherfische in [$\mu\text{g}/\text{kg}$] Frischsubstanz (FS) (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$); $n = 3$

	$\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS
KF & nSL	210,5 \pm40,2
KF & iSL	418,1 \pm21,6
IF & nSL	286,7 \pm51,7
IF & iSL	600,4 \pm121,5^a

^a($p < 0,05$) ^A($p < 0,01$) ^{AA}($p < 0,001$) vs. KF nSL

^b($p < 0,05$) ^B($p < 0,01$) ^{BB}($p < 0,001$) vs. KF iSL

^c($p < 0,05$) ^C($p < 0,01$) ^{CC}($p < 0,001$) vs. IF nSL

Tabelle 4.18: Mittlere Iodkonzentrationen in den Restkörpern der Räucherfische in [$\mu\text{g}/\text{kg}$] Frischsubstanz (FS) (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$); $n = 3$

	$\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$] FS
KF & nSL	174,4 \pm20,8
KF & iSL	555,8 \pm19,5^{AACC}
IF & nSL	255,8 \pm44,8
IF & iSL	758,8 \pm75,8^{AABBCC}

^a($p < 0,05$) ^A($p < 0,01$) ^{AA}($p < 0,001$) vs. KF nSL

^b($p < 0,05$) ^B($p < 0,01$) ^{BB}($p < 0,001$) vs. KF iSL

^c($p < 0,05$) ^C($p < 0,01$) ^{CC}($p < 0,001$) vs. IF nSL

4.8 Humanernährungsversuch

In einem Humanernährungsversuch sollte die Frage, ob durch den Verzehr der geräucherten Fischfilets eine Verbesserung der Iodversorgung im Menschen erzielt werden kann, untersucht werden. Dabei sollte geklärt werden, welchen Einfluss die Iodfütterung, sowie das Einlegen der Fische in die unterschiedlichen Salzlaken hat.

Hierfür wurde in einem neuntägigen Versuch zweimal im Abstand von drei Tagen (Tag 3 und Tag 6) 180-200 g kaltes, geräuchertes Fischfilet zur Mittagszeit verzehrt. Die Probanden waren in vier Gruppen aufgeteilt, deren mittlere Iodausscheidung in Tabelle 4.19 auf Seite 96 dargestellt ist. Welcher Gruppe sie angehörten, wussten die Teilnehmer nicht. In jeder Gruppe waren sowohl Männer als auch Frauen vertreten.

Die Iodkonzentration im Urin der Versuchsteilnehmer wurde, vor und nach den Fischmahlzeiten, katalytisch mit Hilfe der sauren Nassveraschung bestimmt (siehe 3.5.2). Um eine aussagekräftige Bezugsgröße zu haben, wurde zusätzlich der Creatin Gehalt in einem modifizierten Verfahren nach Jaffé gemessen (siehe 3.6) und mit den erhaltenen Iodkonzentrationen ins Verhältnis gesetzt.

Es nahmen 26 Probanden im Alter von 24 bis 65 Jahre an dem Versuch teil. Davon waren neun männlich und neunzehn weiblich. Das Durchschnittsalter betrug 34 Jahre. Vier der Probanden haben eine bekannte Hypothyreose, zwei Probanden nahmen täglich L-Thyroxin und Iodid zu sich. Diese Probanden wurden nicht in die Auswertung miteinbezogen, um mögliche Verfälschungen durch das täglich substituierte Iodid auszuschließen. Im Anhang sind die Messwerte aller Teilnehmer aufgeführt.

4.8.1 Mittlere Iodausscheidung über den Urin während des Humanernährungsversuchs

Die Gruppe der Probanden, die die höchsten Iodkonzentrationen zu sich genommen hatte (IF iSL), unterschied sich während des Ernährungsversuchs an 3 Tagen signifikant zu der Gruppe, die die niedrigste Menge Iod verzehrte (KF nSL). An Tag 5 und 6 schied sie mit der rund doppelten bzw. 3,1-fachen Iodmenge hoch bzw. höchst signifikant mehr Iod gegenüber der KF nSL-Gruppe aus. Auch an Tag 8 war es mit der etwa 1,6-fachen Menge eine signifikant höhere Iodausscheidung.

Auch schied die IF iSL-Gruppe gegenüber der KF iSL-Gruppe ebenfalls an den Tagen 5, 6 und 8 hoch bzw. höchst signifikant mehr Iod aus. Die Mehrausscheidung betrug an Tag 5 das Doppelte, an Tag 6 das 2,3- und an Tag 8 das 1,9-fache.

Im Vergleich zu der IF nSL-Gruppe schied die IF iSL-Gruppe an Tag 6 mit dem rund 1,8-fachen hoch signifikant mehr Iod aus. An Tag 8 war es mit der 1,6-fachen Menge ebenfalls signifikant mehr.

Bei allen anderen Gruppen konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede an den verschiedenen Tagen nachgewiesen werden.

Tabelle 4.19: Mittlere Iodausscheidung im Urin der vier Versuchsgruppen der Humanernährungsstudie in [μg Iod/ g Creatinin] (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$); $n = 6$

	Tag 1	Tag 2	Tag 3 Fisch	Tag 4	Tag 5	Tag 6 Fisch	Tag 7	Tag 8	Tag 9
KF & nSL	54,7 $\pm 32,4$	64,0 $\pm 24,5$	71,1 $\pm 23,5$	76,3 $\pm 41,5$	42,7 $\pm 15,4$	37,5 $\pm 16,0$	62,4 $\pm 33,6$	62,9 $\pm 25,1$	57,9 $\pm 32,4$
KF & iSL	60,6 $\pm 28,3$	45,8 $\pm 16,1$	59,7 $\pm 37,7$	43,3 $\pm 35,2$	44,1 $\pm 13,8$	50,0 $\pm 16,0$	50,1 $\pm 20,2$	52,3 $\pm 21,3$	38,9 $\pm 12,5$
IF & nSL	70,2 $\pm 20,8$	60,5 $\pm 33,3$	76,4 $\pm 22,9$	73,8 $\pm 46,1$	67,0 $\pm 22,5$	66,6 $\pm 23,9$	63,4 $\pm 31,7$	63,0 $\pm 29,9$	76,8 $\pm 34,3$
IF & iSL	92,2 $\pm 35,5$	77,4 $\pm 31,6$	86,1 $\pm 32,4$	90,6 $\pm 44,9$	88,9 $\pm 40,6$ <i>AB</i>	117,6 $\pm 46,3$ <i>AABBC</i>	110,1 $\pm 54,7$	101,5 $\pm 35,5$ <i>aBc</i>	82,2 $\pm 25,4$

^a($p < 0,05$) ^A($p < 0,01$) ^{AA}($p < 0,001$) vs. KF nSL

^b($p < 0,05$) ^B($p < 0,01$) ^{BB}($p < 0,001$) vs. KF iSL

^c($p < 0,05$) ^C($p < 0,01$) ^{CC}($p < 0,001$) vs. IF nSL

4.8.2 Gesamte Iodausscheidung über den Urin während des Humanernährungsversuchs

Um die gesamte Iodausscheidung der verschiedenen Gruppen über den ganzen Versuchszeitraum miteinander vergleichen zu können, wurde zunächst von jedem Teilnehmer die Fläche unter der Kurve (AUC) und anschließend der Mittelwert der Teilnehmer einer Gruppe gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.20 auf der nächsten Seite ersichtlich.

Die Gruppe IF iSL schied während dem ganzen Versuchszeitraum statistisch signifikant mehr Iod im Vergleich zu den anderen Gruppen aus. Mit der rund 1,6- bzw. 1,9-fachen Iodausscheidung gegenüber der KF nSL bzw. KF iSL-Gruppe, war dies jeweils eine hoch bzw. höchst signifikante Mehrausscheidung. Auch gegenüber der IF nSL-Gruppe schied sie mit der 1,4-fachen Menge signifikant mehr Iod aus.

Zwischen den anderen Gruppen konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede

Tabelle 4.20: Statistische Auswertung der Fläche unter der Kurve (AUC) von der Iodausscheidung im Urin bezogen auf die Creatininausscheidung der verschiedenen Versuchsgruppen im gesamten Versuchszeitraum in [μg Iod/g Creatinin] (Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung $\pm\sigma$); $n = 6$

	AUC Iod/Creatinin $\bar{x} \pm \sigma$ [$\mu\text{g}/\text{g}$]
KF & nSL	485,7 $\pm 143,4$
KF & iSL	399,3 $\pm 33,7$
IF & nSL	551,0 $\pm 202,5$
IF & iSL	765,6 $\pm 211,2$ ^{ABBc}

^a($p < 0,05$) ^A($p < 0,01$) ^{AA}($p < 0,001$) vs. KF nSL

^b($p < 0,05$) ^B($p < 0,01$) ^{BB}($p < 0,001$) vs. KF iSL

^c($p < 0,05$) ^C($p < 0,01$) ^{CC}($p < 0,001$) vs. IF nSL

in der gesamt ausgeschiedenen Iodmenge beobachtet werden. Interessant ist die im Mittel um $86,4 \mu\text{g}$ Iod/g Creatinin höhere Iodausscheidung der KF nSL-Gruppe gegenüber der KF iSL-Gruppe.

Diskussion

5.1 Feldfütterungsversuch zur Iodanreicherung in Süßwasserfischen

In einem sechsmonatigen Feldfütterungsversuch erhielten vier verschiedene Süßwasserfischarten ein Fischfutter, das mit der maximal zulässigen Iodmenge von 20 mg/kg in Form von Calciumiodat angereichert war. Der Fütterungsversuch fand in zwei privaten Fischzuchtbetrieben unter Praxisbedingungen statt. Ziel des Versuches war es, die Iodkonzentration in den Süßwasserfischen zu erhöhen und somit ein wertvolleres Nahrungsmittel für den Menschen zu produzieren. Nach 11 und 24 Wochen der Iodfütterung wurden von jeder Fischgruppe Tiere geschlachtet und der Iodgehalt im Filet analysiert. Eine Kontrollgruppe ohne iodsupplementiertes Futter stand bis zur ersten Schlachtung zur Verfügung.

Zusätzlich sollte der Iodgehalt von in Bayern freilebenden Fischen mit dem der Zuchtfische verglichen werden.

Des Weiteren sollte geklärt werden, wie sich das Iod innerhalb der Fische verteilt und ob es, wie in der Literatur berichtet, zu einer starken Iodanreicherung insbesondere in den weiblichen, geschlechtsreifen Gonaden kommt. Dazu wurden die einzelnen Bestandteile von drei bzw. sechs Fischen einer Fischgruppe aus S1 auf ihren Iodgehalt untersucht.

Im Rahmen eines Räucherversuchs sollte untersucht werden, welchen Einfluss das Einlegen von Regenbogenforellen in verschiedene Salzlaken vor dem eigentlichen Räucherungsprozess auf den Iodgehalt hat. In einem Humanernährungsversuch sollte die Frage, ob durch den Verzehr der geräucherten Fische die Iodversorgung im Menschen verbessert werden kann, geklärt werden. Zudem sollte untersucht werden, ob durch die unterschiedliche Fütterung und die unterschiedlichen Salzlaken Unterschiede in der Iodversorgung der Probanden beobachtet werden können.

5.2 Schlacht-und Filetgewichte

Die Schlacht- und Filetgewichte waren keine Zielparameter der vorliegenden Arbeit, jedoch wurden sie im Rahmen der beiden Schlachtungen mitbestimmt. Ihre Entwicklung zwischen S1 und S2 verlief bei den verschiedenen Gruppen unterschiedlich, wie aus Abbildung 5.1 auf der nächsten Seite ersichtlich ist. Während die Regenbogen- und Seeforellen eine signifikante Zunahme der Schlacht- und Filetgewichte hatten und die Seesaiblinge ebenso an Gewicht zunahmten, kam es bei den Bachforellen zu einer leichten Gewichtsabnahme bei ihrem Schlachtgewicht, ihr Filetgewicht blieb hingegen konstant. Bei den Bachforellen aus S1 hatten die Filets lediglich einen Gewichtsanteil von 35% am Gesamtgewicht, was durch die Ausbildung der Gonaden dieser Tiere bedingt sein dürfte. Bei geschlechtsreifen Fischen kommt es zu einem Rückgang des prozentualen Gewichtsanteils der Filets.

Bei der Beurteilung der Gewichtsentwicklung muss berücksichtigt werden, dass zum einen die Anzahl der geschlachteten und untersuchten Fische relativ gering war und individuelle Unterschiede von auseinandergewachsenen Tieren innerhalb einer Gruppe relativ stark ins Gewicht fielen. Auch wurde die zum Teil hohe Streuung innerhalb einer Gruppe durch die geringe Probenanzahl begünstigt. Zum anderen lagen die beiden Schlachtungen in den Herbst- und Wintermonaten und fielen bei den Bachforellen in S1 in die Zeit vor dem Ablaichen. In dieser Zeit nehmen diese Tiere naturgemäß weniger Nahrung zu sich, so dass in dieser Zeit mit keinen großen Gewichtszunahmen gerechnet werden kann.

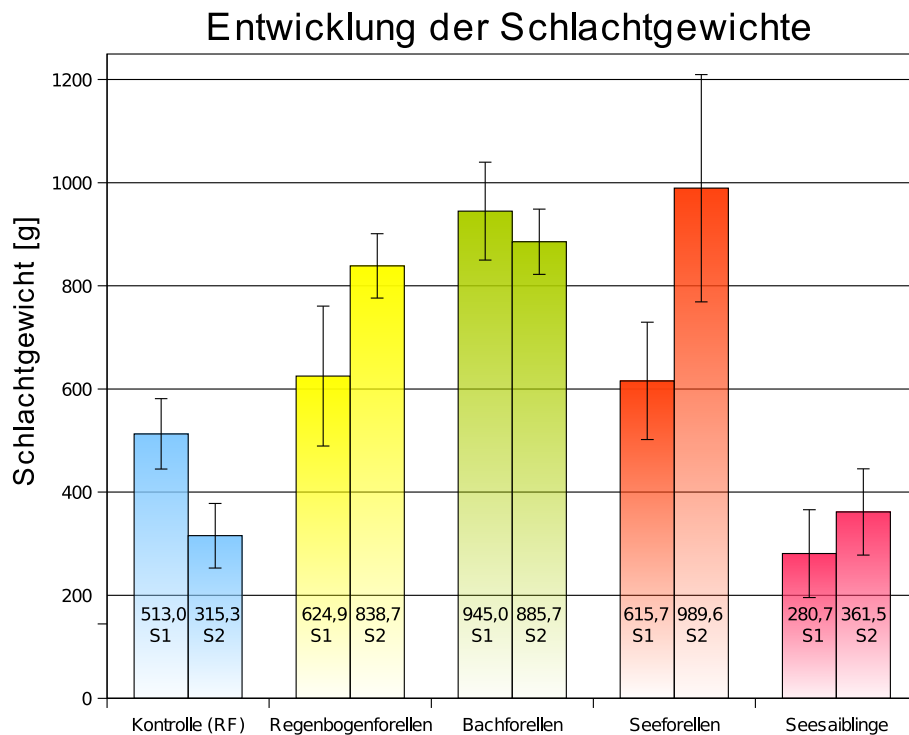


Abbildung 5.1: Mittlere Schlachtgewichte der verschiedenen Fischarten aus der ersten (S1) und zweiten (S2) Schlachtung

Bei den Kontrollfischen wurde sowohl im Schlacht- als auch Filetgewicht eine hoch signifikante Gewichtsabnahme beobachtet. Wie bereits unter 4.6.1.3 erwähnt, wurden die Kontrollfische vor S2 versehentlich verkauft. Es mussten daher bei der zweiten Schlachtung jüngere Regenbogenforellen verwendet werden. Aus diesem Grund stand eine Kontrollgruppe nur bis zur ersten Schlachtung zur Verfügung.

Eine negative Beeinflussung der Gewichtsentwicklung der Schlacht- und Filetgewichte durch die Iodsupplementierung des Futters konnte bei keiner Gruppe beobachtet werden. Nach Literaturangaben hatten selbst Konzentrationen von über 60 mg Iod/kg im Futter keinen negativen Einfluss auf die Gewichtsentwicklung bei Fischen (ESFA, 2005).

5.3 Iodkonzentration in den Fischfuttern

Die Fischfutter wurden durch die alkalische Trockenveraschung aufgeschlossen und ihr Iodgehalt mit Hilfe der katalytischen Reaktion nach Sandell und Kolthoff bestimmt (siehe 3.5.1).

Das Iod in den Kontrollfuttern stammte aus den für die Futterherstellung verwendeten Rohstoffen. Insbesondere Futter von karnivoren Fischen wird durch den Zusatz von Fischmehl oder anderen marinen Produkten mit Iod angereichert. Bei beiden Probenentnahmen hatten die Kontrollfutter dieselbe Iodkonzentration von 1 mg/kg TS, was in Abbildung 5.2 auf der nächsten Seite zu sehen ist.

Die Iodkonzentration des Carotinfutters, welches den iodgefütterten Regenbogenforellen zu 20% zugefüttert wurde, lag mit rund 0,7 mg/kg TS noch etwas niedriger und hatte auf die Iodversorgung dieser Tiere, die zu 80% mit dem Iodfutter gefüttert wurden, keinen negativen Einfluss. Allerdings ist es möglich, dass durch eine ausschließliche Fütterung mit dem Iodfutter eine noch höhere Steigerung der Iodkonzentration in diesen Fischen erreicht werden kann.

Das mit Calciumiodat supplementierte Futter aus der ersten Probenentnahme enthielt 20 mg Iod/kg TS. Aus den Probenentnahmen von S2 konnten Iodkonzentrationen ermittelt werden, die rund 5 mg/kg TS niedriger lagen. Es kam in den drei Monaten zwischen den Probenentnahmen scheinbar zu einem Iodverlust von 25%.

Nach Diosady et al. (1998) haben die Luftfeuchtigkeit und die Verpackung von iodiertem Salz einen Einfluss auf dessen Stabilität. Hohe Luftfeuchtigkeit kann zu einem schnellen Iodverlust in mit Kaliumiodat supplementierten Salz von 30 bis 98% führen. Das Verpacken in Hochdruckpolyethylen-Säcke, die gut gegen Feuchtigkeit schützen, reduziert hingegen einen Iodverlust und die Iodkonzentration bleibt für sechs bis zwölf Monate relativ stabil.

Die Iodverluste im Iodfutter können einerseits während der Lagerung des Futters aufgrund der leichten Sublimation von Iod entstanden sein. Durch die bereits geöffneten Futtersäcke und eine hohe relative Luftfeuchtigkeit in den Wintermonaten könnte dies begünstigt worden sein. Andererseits können auch Fehler während der Iodanalyse Ursache für die Verluste sein.

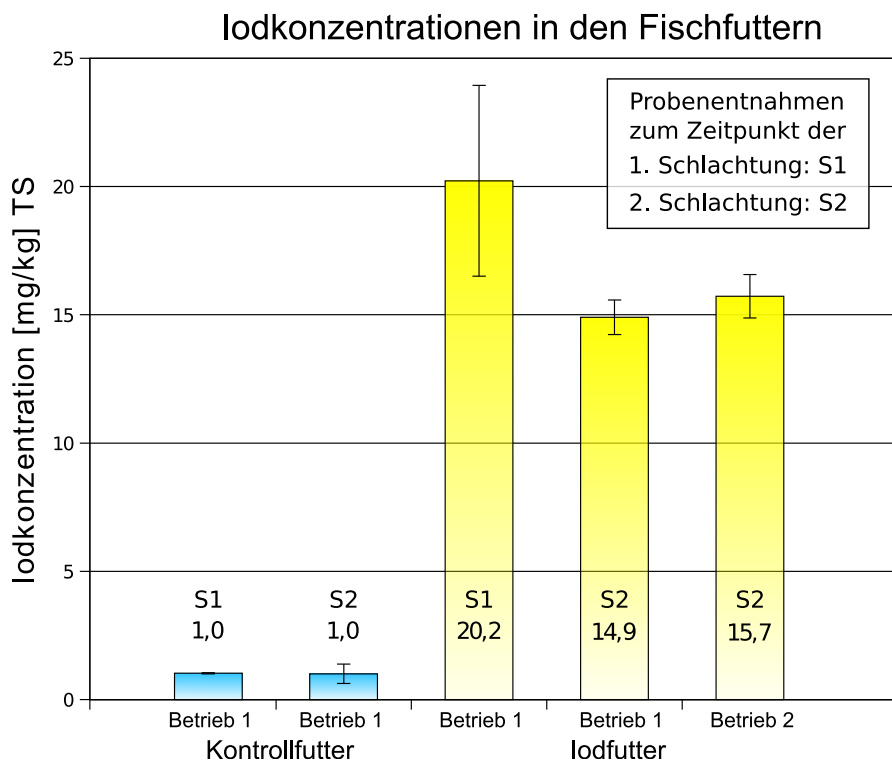


Abbildung 5.2: Iodkonzentrationen in den Fischfuttern aus Betrieb 1 und 2 zum Zeitpunkt der ersten (S1) und zweiten (S2) Probenentnahme

5.4 Iodkonzentration in den Fischen

Die Fischproben wurden mit Hilfe der alkalischen Trockenveraschung aufgeschlossen und die Iodkonzentration durch die katalytische Reaktion nach Sandell und Kolthoff bestimmt (siehe 3.5.1).

Eine Besonderheit im vorliegenden Fütterungsversuch war die Durchführung unter Feldbedingungen. Alle Versuchstiere lebten in Naturteichen, wodurch sie neben dem Iodfutter in gewissem Umfang auch Zugang zu natürlicher Nahrung hatten. Die Fütterung erfolgte von Hand. Zudem wurde der Iodgehalt von in Bayern freilebenden Fischen mit Fischen aus Aquakultur verglichen.

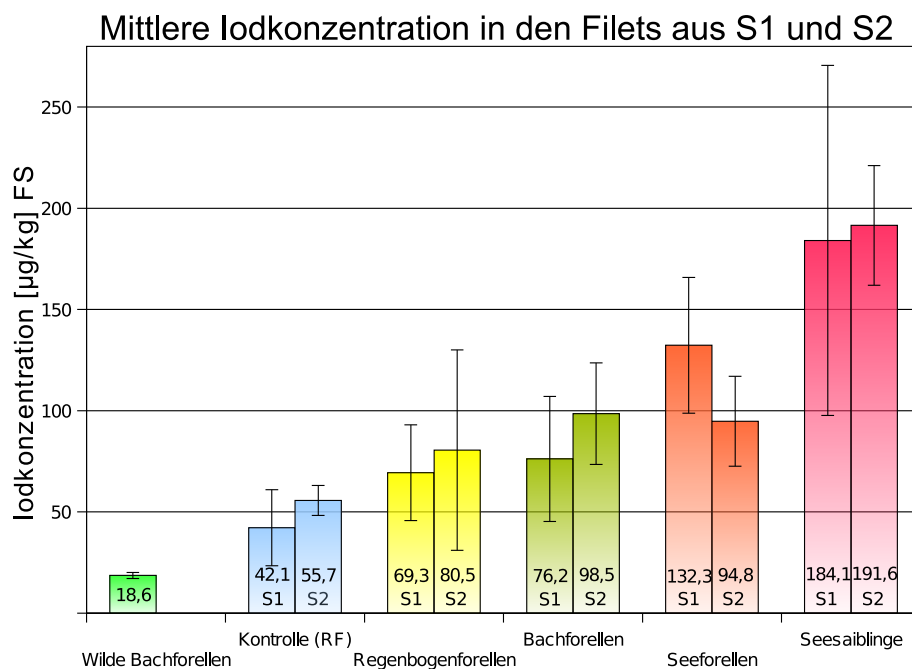


Abbildung 5.3: Entwicklung der mittleren Iodkonzentrationen in den Filets der verschiedenen Fischarten zwischen der ersten (S1) und zweiten (S2) Schlachtung, sowie Iodkonzentrationen der wilden Bachforellen

5.4.1 Iodkonzentration in den Filets

Bemerkenswert war der deutliche Unterschied in der Iodkonzentration zwischen den freilebenden Bachforellen und den Fischen, die in menschlicher Obhut gehalten wurden. Wie aus Abbildung 5.3 zu ersehen ist, hatten die Filets der Wildfische einen vergleichsweise niedrigen Iodgehalt im Gegensatz zu den Zuchtfischen.

Mit rund $18,6 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS lag die Iodkonzentration der wilden Bachforellen in Bereichen, wie sie von Süßwasserfischen aus unterschiedlichen Quellen berichtet wird. Dabei gibt es auch bei den Süßwasserfischen artspezifische und individuelle Unterschiede im Iodgehalt. In der Literatur sind Iodgehalte, die von 5 bis $8 \mu\text{g}$ Iod/kg FS bei Barben aus Ostafrika, 9 bis $100 \mu\text{g}$ Iod/kg FS bei Forellen und 14 bis $101 \mu\text{g}$ Iod/kg FS bei Nilbuntbarschen aus verschiedenen ostafrikanischen Seen reichen, beschrieben (Karl und Münkner, 1999; Eckhoff und Maage, 1997; Andersen et al., 2002).

Die Kontrollfische (RF) aus S1 hatten innerhalb der Fische aus Aquakultur die niedrigste Iodkonzentration, sie lag dennoch über dem etwa 2,3-fachen Gehalt der Wildfische.

Die Bachforellen aus der Fischzucht hatten gegenüber den wilden Bachforellen einen 4,1- bzw. 5,3-fach höheren Iodgehalt im Filet. Am stärksten war der Unterschied zu den Seesaiblingen aus S2, die eine 10,3-fach höhere Iodkonzentration in ihren Filets aufwiesen als die wilden Bachforellen.

Allein durch die Fütterung mit kommerziellem Futter, das einen Iodgehalt von 1 mg Iod/kg hatte, konnten höhere Iodkonzentrationen in den Filets erzielt werden als bei den wilden Bachforellen. Nach Eckhoff und Maage (1997) absorbieren Fische Iodid aus der Nahrung und dem umgebenden Wasser. Da die Gewässer in Bayern einen relativ niedrigen Iodgehalt aufweisen, kann man davon ausgehen, dass die höheren Iodkonzentrationen der Zuchtfische durch die iodreiche Nahrung bedingt sind und diese nicht durch unterschiedliche Iodkonzentrationen in den Gewässern hervorgerufen werden.

Innerhalb der mit dem Iodfutter gefütterten Zuchtfische wiesen die Regenbogenforellen die niedrigsten Iodkonzentrationen auf. Durch die Supplementierung des Futters mit 20 mg Iod/kg TS konnte der Iodgehalt in den Filets der Regenbogenforellen aus S2 im Vergleich zu S1 durchschnittlich um $11,2 \mu\text{g}$ Iod/kg FS auf $80,5 \mu\text{g}$ Iod/kg FS gesteigert werden, was einer Zunahme von 16% entsprach.

Verglichen mit den Ergebnissen von Schmidter (2000), die in ihrem Versuch Regenbogenforellen maximal 8 mg Iod/kg in Algen- und Kaliumiodat zugesetzt hatte, und in 16 Wochen, unabhängig vom Iodzusatz, von einer Steigerung um $70 \mu\text{g}$ Iod/kg FS auf $120 \mu\text{g}$ Iod/kg FS berichtet, liegen die Iodkonzentrationen der Regenbogenforellen aus diesem Feldversuch niedriger. Auch Kuznik (2001) konnte bei Regenbogenforellen, die über sechs Monate 16 mg Iod/kg aus *Laminaria digitata* erhalten hatten, $271 \mu\text{g}$ Iod/kg FS sowie bei den Kontrollfischen $121 \mu\text{g}$ Iod/kg FS in den Filets der Fische finden. Diese Iodkonzentrationen liegen ebenfalls über den Iodkonzentrationen aus diesem Feldversuch.

Die Bachforellen hatten in beiden Schlachtungen, ebenso wie die Seeforellen und Seesaiblinge, eine höhere Iodkonzentration in den Filets als die Regenbogenforellen. Die Zunahme der Iodkonzentration zwischen beiden Schlachtungen war bei den Bach-

forellen mit rund 29% am höchsten. Bei den Seesaiblingen betrug sie 4% und bei den Seeforellen kam es scheinbar zu einer Abnahme von 28%. Diesem recht inhomogenen Bild können verschiedene Ursachen zu Grunde liegen. Zum einen fallen, wie bereits erwähnt, aufgrund der relativ geringen Probenanzahl, individuelle Schwankungen stark ins Gewicht. Da alle Fische in großen Naturteichen lebten und die Fische von Hand gefüttert wurden, ist es möglich, dass es zu unterschiedlichen Futterraufnahmen und unterschiedlich starken Iodanreicherungen innerhalb einzelner Individuen kam. Zum anderen wurde beim Abfischen der Tiere eine gewisse „Vorselektion“ vollzogen.

Innerhalb der Zuchtfische aus diesem Feldversuch hatten die Seesaiblinge die höchste Iodkonzentration im Filet. In S2 lag sie höchst signifikant über den Iodkonzentrationen in den Filets der anderen Fische. Zwischen beiden Schlachtungen konnte jedoch keine starke Zunahme der Iodkonzentration beobachtet werden.

Burkard (2002) fand in ihrem Versuch an Elsässer Saiblingen eine relativ hohe Iodkonzentration im Filet der Tiere. Sie lag nach sechsmonatiger Versuchsdauer bei den Kontrollfischen bei $162 \mu\text{g}$ Iod/kg FS und bei den algengefütterten Tieren (34 mg/kg) bei $416 \mu\text{g}$ Iod/kg FS. Auch Schmid (2003) fand bei Elsässer Saiblingen (34 mg/kg) nach neunmonatiger Fütterung in den Filets der Kontrollfische eine Iodkonzentration von rund $87 \mu\text{g/kg}$ FS, bei den algengefütterten lag die Konzentration mit $297 \mu\text{g/kg}$ FS um das 3,4-fache höher.

Im vorliegenden Versuch hatten die iodgefütterten Seesaiblinge ebenfalls einen niedrigeren Iodgehalt als die algengefütterten Elsässer Saiblinge aus den Versuchen von Burkard (2002) und Schmid (2003).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass innerhalb der untersuchten Salmonidaearten die Seesaiblinge die höchsten Iodkonzentrationen in den Filets hatten, gefolgt von den See- und Bachforellen. Den niedrigsten Gehalt wiesen die Regenbogenforellen auf. Ihr Iodgehalt in den Filets war in S1 1,6-fach, in S2 1,9-fach über der Iodkonzentration der Kontrollfische aus S1. Es konnte gezeigt werden, dass mit der maximal zulässigen Iodmenge von 20 mg/kg , in Form von Calciumiodat im Fischfutter, unter Praxisbedingungen eine Steigerung der Iodkonzentration in den Fischfilets

erzielt werden kann. Diese Steigerung konnte jedoch nicht bei allen untersuchten Fischarten nachgewiesen werden. Insgesamt sind die Iodzunahmen und die Endkonzentrationen nach sechsmonatiger Fütterung aus diesem Feldversuch nicht so hoch ausgefallen wie bei ähnlichen standardisierten Versuchen in Beton- bzw. Glasfaserstrombecken, in denen die Fische zur Hälfte über Futterautomaten gefüttert wurden.

5.4.2 Iodverteilung innerhalb der Fische

Um über die Iodverteilung innerhalb der Fischkörper etwas aussagen zu können, wurden von je drei Fischen aus S1 alle Körperbestandteile auf ihren Iodgehalt untersucht. Da die Bachforellen zu diesem Zeitpunkt kurz vor dem Ablaichen standen, sollte auch die Frage, ob sich das Iod in den Gonaden dieser Tiere anreichert, geklärt werden. Von ihnen wurden sechs Tiere, davon fünf weibliche und ein männliches, untersucht. Die Iodkonzentrationen in den verschiedenen Bestandteilen der jeweiligen Fischarten sind in den Abbildungen 5.4 und 5.5 auf Seite 111, 5.6 und 5.7 auf Seite 112 sowie 5.8 und 5.9 auf Seite 113 dargestellt.

5.4.2.1 Haut

Die Iodkonzentration in der Haut war bei allen Fischen höher als im Filet. Sie lag zwischen dem doppelten bei den Wildfischen und den Regenbogenforellen und bis zum 5,4-fachen über der Filetiodkonzentration der Kontrollfische. Maximalwerte von über 850 $\mu\text{g}/\text{kg}$ FS konnten bei den Seesaiblingen gefunden werden. Bei dieser Gruppe war die Standardabweichung, wie auch in den anderen Kompartimenten, relativ hoch, was durch den deutlich niedrigeren Iodgehalt von einem Seesaibling bedingt ist. Da wie bereits unter 4.6.1.2 erwähnt, auch in der Literatur von starken individuellen Schwankungen im Iodgehalt innerhalb einer Fischart berichtet wird, wurden die Iodkonzentrationen dieses Fisches nicht als Extremwert behandelt.

In vorherigen Fütterungsversuchen an Süßwasserfischen wurden auch höhere Iodkonzentrationen in der Haut, verglichen mit den Filets, gefunden. Kuznik (2001); Burkard (2002); Schmid (2003) und Kantoci (2008) berichten über Iodkonzentrationen in der Haut von Kontrollfischen, die 1,1 bis 3,5-fach über den Filetkonzentrationen lagen. Ihre iodgefütterten Fische hatten Konzentrationen, die knapp 3 bis 5-fach höher als

in den Filets waren. Auch Eckhoff und Maage (1997) sowie Karl und Münkner (1999) berichten von höheren Gehalten in der Haut, die bis zu 20-fach über denen der Filets liegen.

5.4.2.2 Innereien

Die Innereien der Fische hatten höhere Iodkonzentrationen als die Filets und die Haut. Die Relation der Iodkonzentration von Filet zu den Innereien variierte zwischen dem 2,3-fachen bei den wilden Bachforellen und dem maximal 11,4-fachen bei den Kontrollfischen.

Schmid (2003) fand bei Elsässer Saiblingen (Kontrollfische) in den Innereien eine rund 7,5-fach höhere Iodkonzentration als im Filet. Kuznik (2001) konnte bei Regenbogenforellen sowohl in den Kontroll- als auch bei den algengefütterten Fischen eine 2,9-fach höhere Iodkonzentration in den Innereien als im Filet finden. Die Relationen aus diesem Versuch liegen in ähnlichen Bereichen bzw. übersteigen diese bei den Kontrollfischen.

Nach Janssen (2004) können bei Säugetieren neben der Schilddrüse auch andere Gewebe, wie etwa Speicheldrüsen, Magenschleimhaut, laktierende Milchdrüse, Plexus choroideus und die Zilliarkörper des Auges, Iodid konzentrieren. Leloup und Fontaine (1960) beschreiben, dass niedere Wirbeltiere auch in Geweben wie das Notochord von Cyclostomata, die Kiemen, der Magen und die Gallenblase von Haien, die Haut von Amphibien und die Ovarien von Cyclostomata, Knochenfischen und Amphibien Iod anreichern können. Vor diesem Hintergrund scheint es ersichtlich, dass die Innereien, in denen der gesamte Magen-Darmtrakt, die Leber, Milz, Nieren und Herz, sowie die Schwimmblase enthalten war, eine relativ hohe Iodkonzentration verglichen mit den Filets aufwies. Zusätzlich dürfte auch die anatomische Lage der Schilddrüsenfollikel (2.6 auf Seite 14) dazu geführt haben, dass einige der Follikel in den Innereien enthalten waren, und somit auch einen Beitrag zu der relativ hohen Iodkonzentration geleistet haben.

Da im Magen-Darmtrakt mancher Zuchtfische noch restliche Kotmengen enthalten

waren, ist es wahrscheinlich, dass auch diese einen Anteil an der Iodkonzentration hatten. Alle Zuchtfische wiesen in ihren Innereien eine hoch bzw. höchst signifikant größere Iodkonzentration als die der wilden Bachforellen auf, in deren Magen-Darmtrakt keine größeren Kotmengen enthalten waren.

5.4.2.3 Kiemen

Die höchsten Iodkonzentrationen wurden in den Kiemen der Fische gefunden. Sie lagen weit über den Konzentrationen der anderen Bestandteile und erreichten Maximalwerte von über 18 mg/kg FS bei einer Seeforelle, sowie über 10 mg/kg FS bei drei Bachforellen. In diesen Gruppen war die Standardabweichung aufgrund dieser sehr hohen Einzelwerte recht hoch. Auch die Inhomogenität des Probenmaterials kann die große Streuung mitverursachen.

Bei den wilden Bachforellen lag die Kiemeniodkonzentration 174-fach über der Filetkonzentration und nahm bei den Seesaiblingen mit der rund 21-fachen Konzentration der Filets die geringste Relation zu den Filets an.

Schmid (2003) fand in Kiemen von Kontrollfischen einen Iodgehalt, der mit 372 µg/kg FS im Bereich der Iodkonzentration der Haut dieser Fische lag. Auch sie berichtet von extrem hohen Streuungen. Die Iodgehalte aus dem vorliegenden Versuch lagen deutlich über denen, die Schmid (2003) gemessen hatte.

Nach Leloup und Fontaine (1960) scheiden die Kiemen möglicherweise Iod aus. In einem Versuch an Katzenhaien, denen radioaktives Iod injiziert wurde, fanden sie ein Iodverhältnis in den Kiemen zum Blut von 8:18.

Yu et al. (1996) fanden bei ihren Untersuchungen an Tilapias, dass sich von der zugeführten radioaktiven Iodmenge nach 9 Tagen 15,4% in den Kiemen abgelagert hatte, wobei diese Organe nur 3,8% der Gesamtmasse ausmachten.

Fische nehmen nach Hoffmann (2005) Mineralien und Spurenelemente sowohl oral, als auch über das Kiemenepithel auf. Ein spezieller Mechanismus für die Iodaufnahme bzw. Akkumulation in diesen Organen ist jedoch nicht beschrieben.

Da Schilddrüsenfollikel auch im Bereich der Kiemenbogenansätze liegen können (Hoffmann, 2005), ist es möglich, dass diese in den Kiemenproben enthalten waren und somit einen erheblichen Beitrag zur Iodkonzentration geleistet haben.

5.4.2.4 Restkörper

Die Iodkonzentrationen in den Restkörpern lagen ebenfalls höher als in den Filets der Fische. Sie enthielten zwischen der doppelten und 4,5-fachen Iodkonzentration der Filets.

Kuznik (2001) konnte in ihrem Versuch an Regenbogenforellen bei den Kontrollfischen eine 2,2-fach und bei den algengefütterten Fischen eine 3,2-fach höhere Iodkonzentration in den Restkörpern, verglichen mit den Filets, finden.

In den Restkörpern war der gesamte Kopf mit den darin befindlichen Anteilen, sowie die am Kopf belassene Haut enthalten. Vermutlich befanden sich auch einige Schilddrüsenfollikel in den Restkörpern, so dass diese Anteile ebenfalls zu dem Iodgehalt der Restkörper beitrugen.

5.4.2.5 Gonaden

In den geschlechtsreifen Gonaden der Bachforellen war eine sehr hohe Iodkonzentration enthalten. In den Gonaden der weiblichen Tiere waren knapp über 60% des gesamten Iods enthalten. Bei dem männlichen Tier war es mit 1,2% des Gesamtiodgehaltes deutlich weniger. Die weiblichen Tiere hatten in den Gonaden eine rund 13-fach höhere Iodkonzentration als das männliche Tier. Diese Ergebnisse decken sich mit Berichten aus der Literatur, nach denen sich Iod in geschlechtsreifen Ovarien und den Follikeln anreichert.

So berichten Leloup und Fontaine (1960), dass Regenbogenforellen bis zu 70% von radioaktiv injiziertem Iod in den geschlechtsreifen Ovarien akkumulieren können. Regenbogenforellen und Lachse hätten in den Ovarien eine rund 10 mal höhere Iodkonzentration als im Plasma, bei Neunaugen fanden sie sogar eine 50-100 mal höhere Iodkonzentration. Die Hoden hingegen würden viel weniger Iod als die Ovarien akkumulieren.

Brown-Grant (1961) beschreibt, dass während des Follikelwachstums reichlich Iod im Ovar vorkommt. In Rinderovarien fand er einen Iodgehalt von 9700 $\mu\text{g}/\text{kg}$ FS. Während der Trächtigkeit nahm die Iodkonzentration hingegen ab. Im Corpus Luteum konnte er kein Iod finden.

Nach Slebodziński (2005) ist die Iodkonzentration in den Ovarien von Säugetieren abhängig vom Zyklusstand. Niedriger ist sie präpuberal und nach der Menopause. Höher im Stadium der Fortpflanzungsfähigkeit, während des Follikelwachstums. Hin-gegen kommt es während der Schwangerschaft zu reduzierten Iodkonzentrationen. Er beschreibt, dass durch die Entdeckung des Vorkommens von Natrium-Iod-Symporter in Ovarien ein Mechanismus zur Iodaufnahme in dieses Organ gefunden wurde. Damit handelt es sich in diesem Organ um denselben Mechanismus für die Iodaufnahme wie in der Schilddrüse. Auch fand er, dass sich radioaktives Iod zunächst in der Wand von Follikeln anreichert. Nach einigen Tagen konnte er die höchsten Iodkonzentrationen in der Follikelflüssigkeit messen. Die Rolle der Iodaufnahme und die Akkumulation in ovariellen Gewebe scheint noch unbekannt zu sein, doch gäbe es Anzeichen, dass sie an einer Vielzahl metabolischer Prozesse funktionell beteiligt sei, ebenso wie sie bei der Abwehr und bei Hyperplasien eine Rolle spiele.

Die Ergebnisse aus dem vorliegenden Versuch, in denen hohe Iodgehalte in den Gonaden bzw. den Eiern von geschlechtsreifen, weiblichen Bachforellen gefunden wurden, decken sich mit Berichten aus der Literatur. Auch bei Fischen kann, aufgrund der vorliegenden Ergebnisse von einer Iodakkumulation in den weiblichen, geschlechtsreifen Gonaden ausgegangen werden.

Ein weiterer interessanter Aspekt stellt die Beobachtung dar, dass in den Filets der geschlechtsreifen Bachforellen etwa die Hälfte der prozentualen Iodverteilung, verglichen mit der von den wilden Bachforellen, enthalten war. Anscheinend kommt es bei geschlechtsreifen Fischen, analog zum geringeren prozentualen Filetgewicht, zu einer Abnahme der prozentualen Iodkonzentration in den Filets.

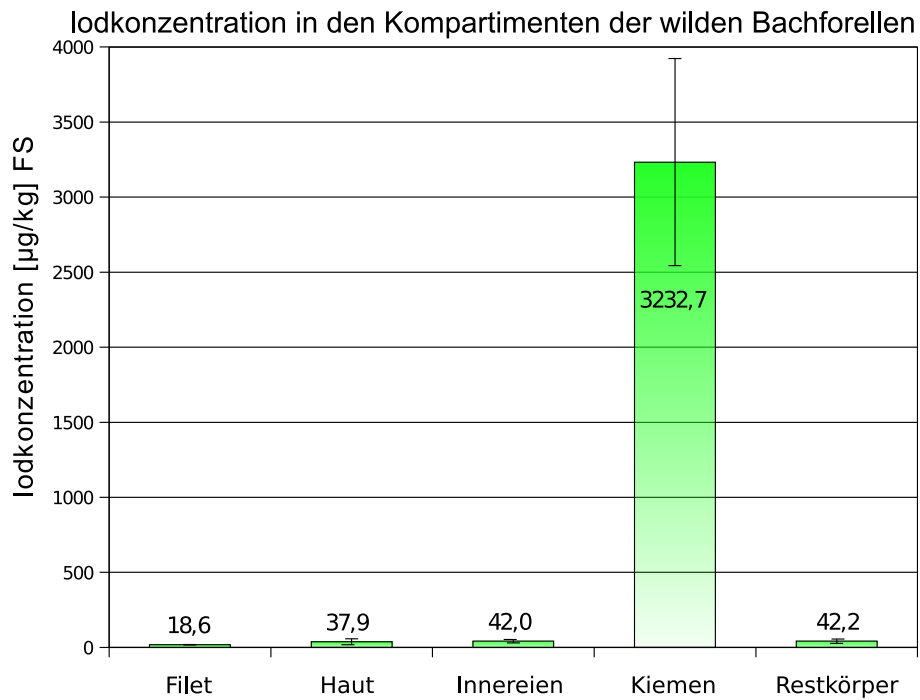


Abbildung 5.4: Iodkonzentration in den Kompartimenten der wilden Bachforellen; $n = 3$

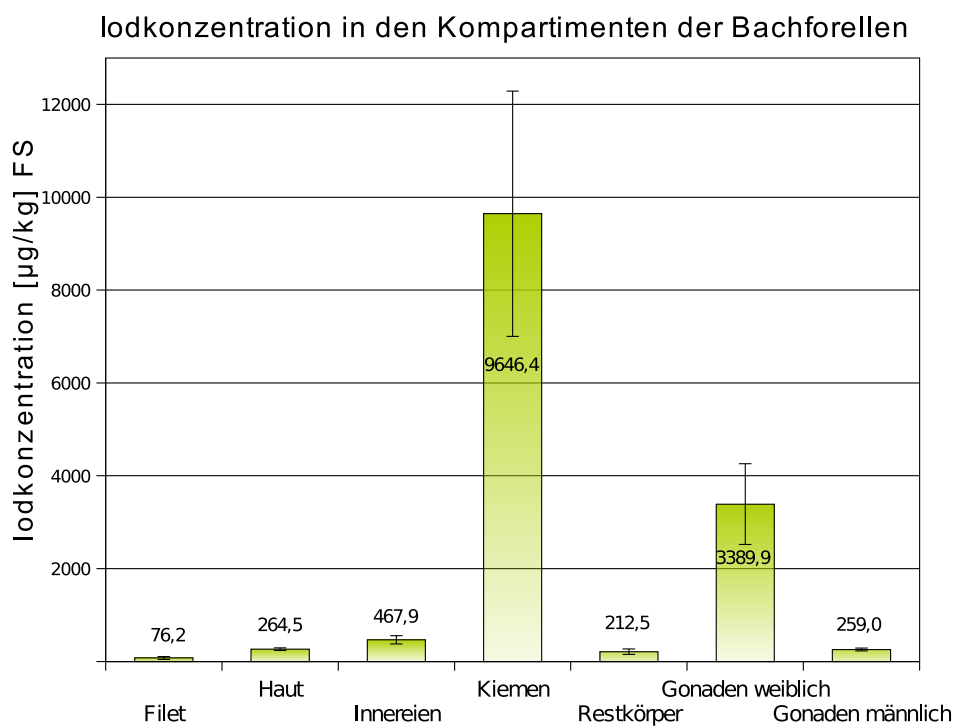


Abbildung 5.5: Iodkonzentration in den Kompartimenten der geschlechtsreifen, iodgefütterten Bachforellen; $n = 6$

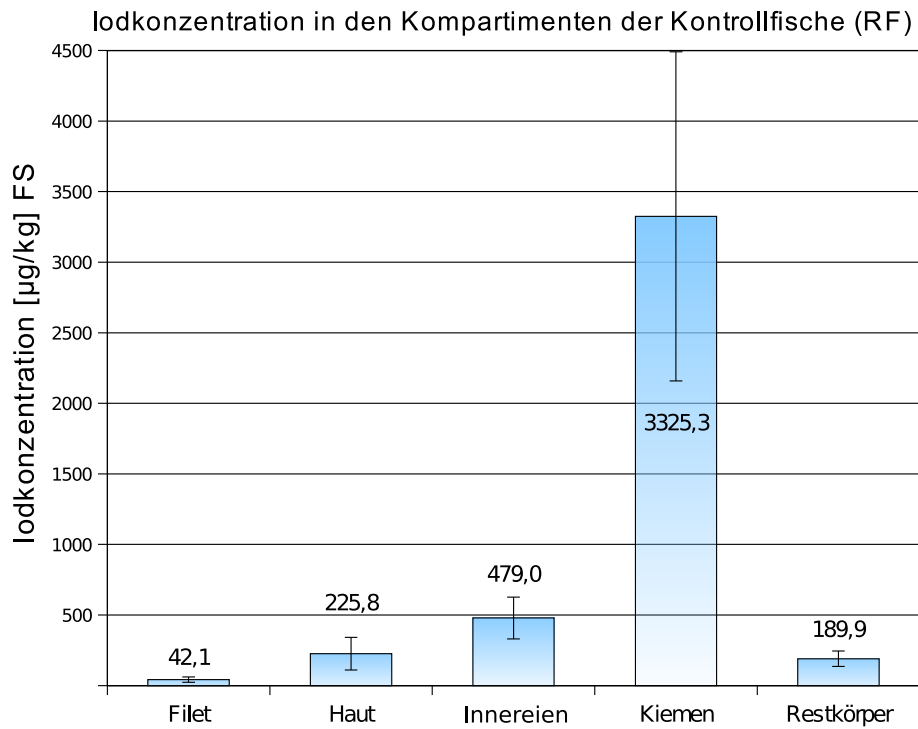


Abbildung 5.6: Iodkonzentration in den Kompartimenten der Kontrollfische (Regenbogenforellen); $n = 3$

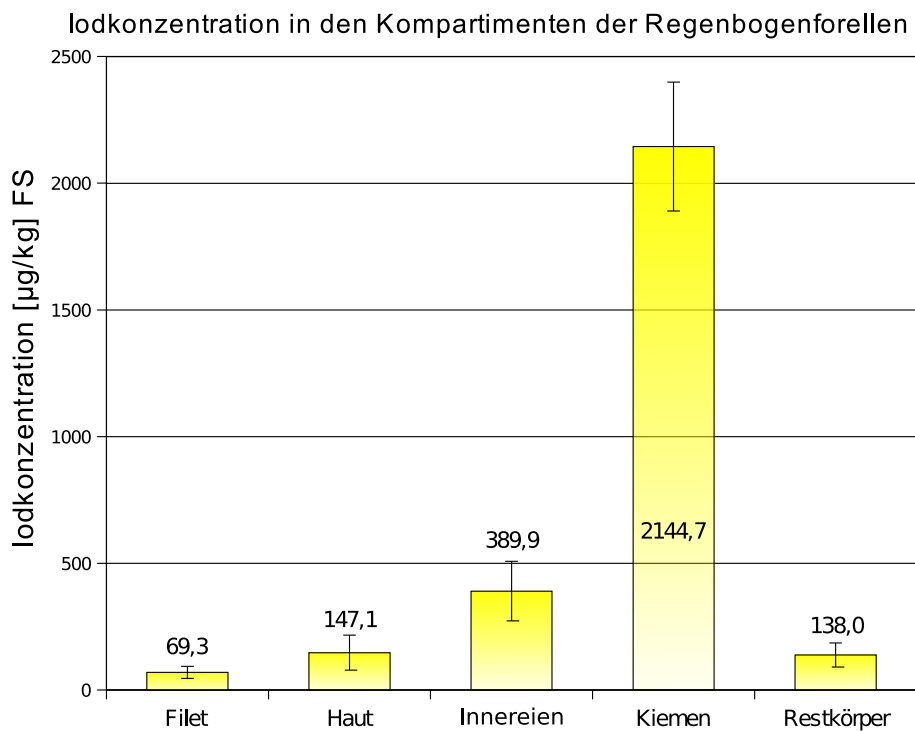


Abbildung 5.7: Iodkonzentration in den Kompartimenten der iodgefütterten Regenbogenforellen; $n = 3$

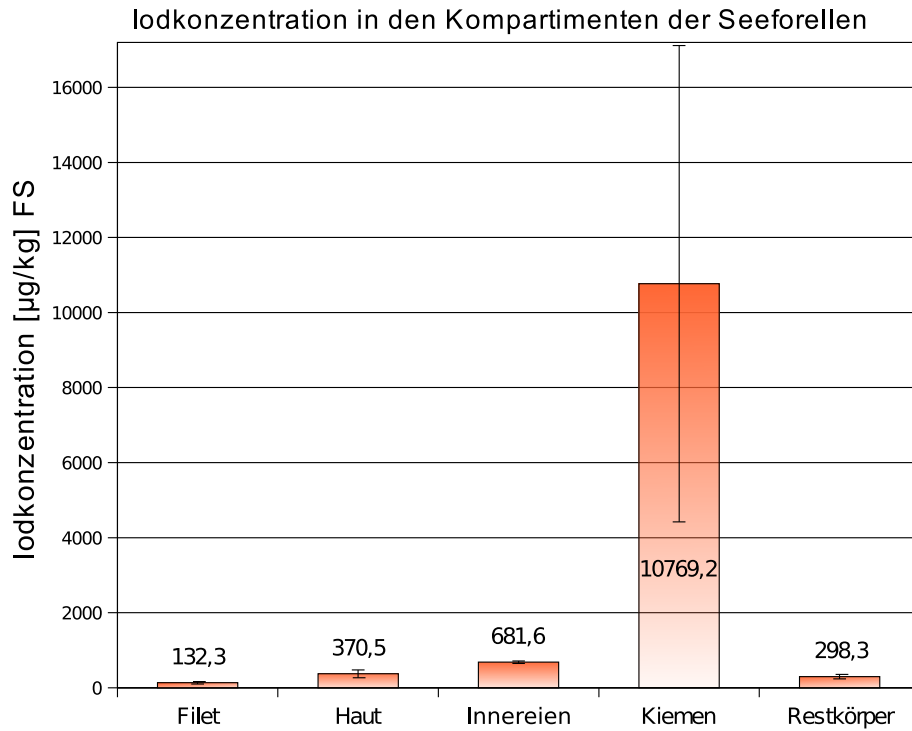


Abbildung 5.8: Iodkonzentration in den Kompartimenten der iodgefütterten Seeforellen; $n = 3$

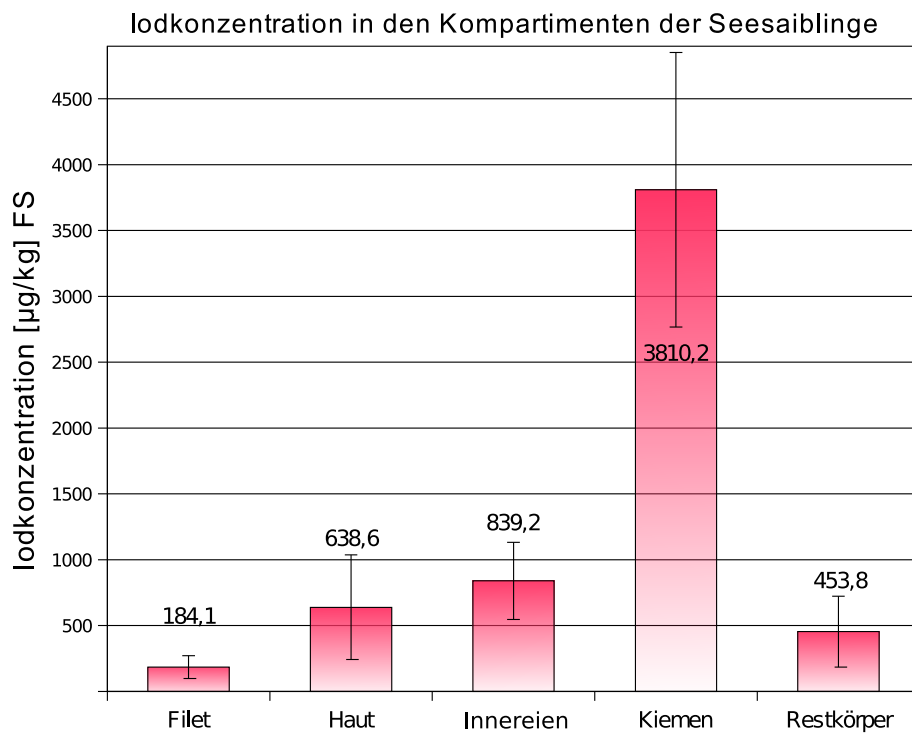


Abbildung 5.9: Iodkonzentration in den Kompartimenten der iodgefütterten Seesaiblinge; $n = 3$

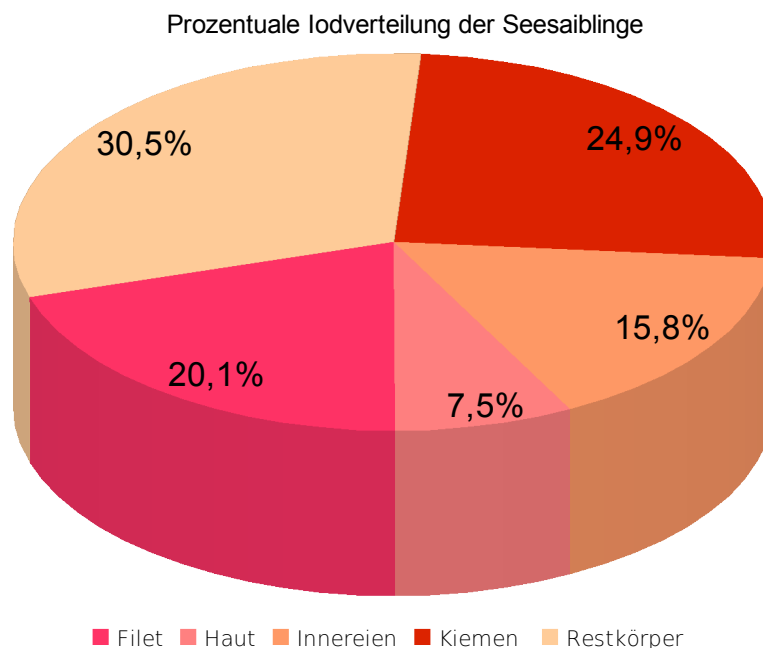


Abbildung 5.10: Prozentuale Iodverteilung in den Fischbestandteilen der Seesaiblinge. In den Filets waren rund 20% des Gesamtiods der Fische enthalten, ihr prozentualer Gewichtsanteil betrug rund 45% vom Gesamtgewicht. In den Restkörpern war mit 30,5% der größte Anteil, gefolgt von knapp 25% in den Kiemen, die lediglich 2,5% des Gesamtgewichts ausmachten. In den Innereien waren 15,8% enthalten. Die Haut hatte mit 7,5% den geringsten Anteil.

In den Untersuchungen zur Iodverteilung innerhalb der verschiedenen Fischbestandteile konnte festgestellt werden, dass die Iodkonzentration in den Fischfilets gegenüber den anderen Bestandteilen am geringsten war. Trotz ihres hohen Gewichtsanteils, der in S1 bei den verschiedenen Fischarten zwischen 35 und 46,9% des Gesamtgewichts betrug, war in den Filets nur 3,4% bis 20% des Gesamtiods enthalten. Für Muskelgewebe ist kein Mechanismus bekannt, mit dem aktiv Iod in diese Gewebe aufgenommen werden kann. In Abbildung 5.10 ist beispielhaft die prozentuale Iodverteilung der verschiedenen Fischbestandteile der Seesaiblinge dargestellt.

Die höchsten Iodkonzentrationen wurden in den Kiemen der Fische gefunden, für die ebenfalls kein spezieller Mechanismus für die Iodaufnahme beschrieben ist. Aufgrund ihrer anatomischen Lage ist es jedoch möglich, dass im Probenmaterial der Kiemen Schilddrüsenfollikel enthalten waren. Auch bei den Innereien und den Rest-

körpern können solche Anteile enthalten gewesen sein. Die weiblichen Gonaden der geschlechtsreifen Bachforellen hatten ebenfalls eine relativ hohe Iodkonzentration, die weit über den Filetiodykonzentrationen lag.

Die Iodverteilungen auf die unterschiedlichen Bestandteile innerhalb der verschiedenen Fischarten waren nicht einheitlich. Zum einen können sich dabei individuelle und artspezifische Variationen widerspiegeln, zum anderen hatte der Zyklusstand (geschlechtsreife Bachforellen), sowie eventuell leichte Unterschiede bei der Zerlegung der Fische, mögliche Unterschiede der anatomischen Lage der Schilddrüsenfollikel sowie unterschiedliche Restmengen von Kot in den Magen-Darmtrakten zu diesen Variationen geführt. Eine weitere Ursache können zum Teil unterschiedliche Grade der Homogenität des Probenmaterials sein. Besonders bei den Kiemen, den Restkörpern und der Haut konnte nicht immer dieselbe Homogenität des zerkleinerten Materials erreicht werden. Dagegen gab es bei den Filets, den Innereien und den Gonaden keine größeren Unterschiede der Homogenität der Proben.

5.5 Räucherversuch

Im vorliegenden Versuch wurden je 10 Kontrollfische und iodgefütterte Regenbogenforellen sowohl in eine iodhaltige als auch in eine normale Salzlake eingelegt. Der Einfluss der verschiedenen Laken auf den Iodgehalt in den verschiedenen Bestandteilen Filet, Haut und Restkörper wurde untersucht. Zudem sollte die Frage, ob durch den Verzehr dieser Fische eine verbesserte Iodversorgung im Menschen erzielt werden kann und ob es dabei zu Unterschieden aufgrund der unterschiedlichen Fütterung und der Verwendung von verschiedenen Salzlaken kommt, geklärt werden.

5.5.1 Iodkonzentrationen der Filets

Über die Änderung des Iodgehalts nach verschiedenen Zubereitungsformen gibt es in der Literatur recht unterschiedliche Angaben. So wird über gleichbleibende, abnehmende und zunehmende Iodkonzentrationen berichtet (Montag und Grote, 1981; Karl und Münkner, 1999; Karl et al., 2005).

Burkard (2002) führte an Elsässer Saiblingen einen Räucherversuch durch, bei dem es zu einem Iodverlust von 18% kam. Schmid (2003) untersuchte an denselben Fischen, ob die aufgetretenen Iodverluste durch vorheriges Einlegen der Fische in eine iodhaltige Salzlake ausgeglichen werden konnten. Bei den Algen- und den Kontrollfischen konnte sie eine Erhöhung der Iodkonzentration von $100 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS erreichen. Dies entsprach einer Iodzunahme von 50% bei den Kontroll- und 15% bei den Algenfischen. Die mittleren Iodkonzentrationen der Filets nach dem Räucherungsprozess aus dem vorliegenden Versuch sind in Abbildung 5.11 auf Seite 118 dargestellt. Durch das Einlegen in die iodhaltige Salzlake konnte sowohl bei den Kontroll- als auch bei den Iodfischen eine Steigerung in der Filetiodykonzentration von 216 (KF) bzw. $262 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS (IF) erreicht werden. Bei den Kontrollfischen entsprach dies einer Steigerung von knapp 360%, bei den Iodfischen rund 230%.

Diese Erhöhungen liegen deutlich über den von Schmid (2003) beobachteten Steigerungen. Die Iodkonzentrationen der iodgefütterten Regenbogenforellen aus diesem Versuch lagen allerdings, auch nach dem Einlegen in die iodhaltige Salzlake, knapp 59% unter der Iodkonzentration, die Schmid's Elsässer Saiblinge aus iodhaltiger Salzlake ($641 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS) hatten.

Vergleicht man die Iodkonzentrationen der rohen Filets aus 4.7 auf Seite 82 mit denen der Räucherfische aus 4.15 und 4.16 auf Seite 93 ergibt sich folgendes Bild:

Bei den Kontrollfischen konnte durch das Räuchern mit vorherigem Einlegen in normale Salzlake eine Steigerung der Iodkonzentration von knapp 43% erreicht werden. Die Fische aus iodhaltiger Lake hatten eine um rund 560% höhere Iodkonzentration. Die geräucherten iodgefütterten Regenbogenforellen aus normaler Salzlake hatten einen etwa 67% höheren Iodgehalt als die rohen Filets. Durch die iodhaltige Einlake konnte eine Erhöhung um etwa 440% erzielt werden.

Zusammenfassend konnte in diesem Räucherversuch eine Steigerung der Iodkonzentration in den geräucherten Fischfilets gegenüber den rohen Filets erzielt werden, die durch das Einlegen in normaler Salzlake bei 43% (KF) und 67% (IF) lag. Diese Werte liegen damit etwas über den Ergebnissen wie sie Karl et al. (2005) beim Rotbarsch,

mit einer Erhöhung von etwa 30% durch Heißräuchern gefunden haben.

Das Einlegen der Fische in iodhaltige Salzlake führte zu deutlich höheren Iodkonzentrationen in den Filets als das Einlegen in normale Salzlake. Damit konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von iodhaltiger Salzlake eine sehr effektive Maßnahme ist, um den Iodgehalt in geräucherten Fischen, besonders den Filets, zu erhöhen.

Die iodgefütterten Fische aus der normalen Salzlake hatten eine um rund 92% höhere Iodkonzentration in ihren Filets als die Kontrollfische. Auch hatten die Iodfische aus der iodhaltigen Salzlake gegenüber den Kontrollfischen aus iodhaltiger Lake eine um rund $100 \mu\text{g}/\text{kg}$ FS höhere Iodkonzentration. Dies entsprach einem Mehrgehalt von 37%. Neben der Verwendung von iodhaltiger Salzlake stellt auch die Supplementierung des Fischfutters auf die maximal zulässige Iodmenge von 20 mg/kg eine sinnvolle Möglichkeit dar, um den Iodgehalt in den Fischfilets zu erhöhen.

5.5.2 Iodkonzentrationen der Haut

Die Hautiodkonzentration der geräucherten Fische lag bei den Kontrollfischen aus normaler Salzlake in etwa dem Bereich wie die der rohen Fische. Durch die iSL konnte bei diesen Tieren eine Steigerung der Iodkonzentration von rund 85% gegenüber der rohen Fischhaut erreicht werden.

Die geräucherten Iodfische aus nSL hatten eine um etwa 95%, die aus iSL etwa 310% höhere Iodkonzentration in der Haut als die rohen Fische.

Auch hier erwies sich das Einlegen in iodhaltige Salzlake als eine sehr effektive Maßnahme, um die Iodkonzentration der Haut zu steigern. Aufgrund der recht hohen Iodgehalte der Fischhaut könnte die Iodaufnahme des Menschen durch den Verzehr der Fischfilets inklusive der daran belassenen Haut gesteigert werden.

5.5.3 Iodkonzentrationen der Restkörper

Wie schon bei der Iodkonzentration der Haut, lag die Iodkonzentration der Restkörper von den KF nSL etwa in demselben Bereich wie die der rohen Tiere. Durch die Verwendung von iSL konnte eine Erhöhung um rund 193% erreicht werden.

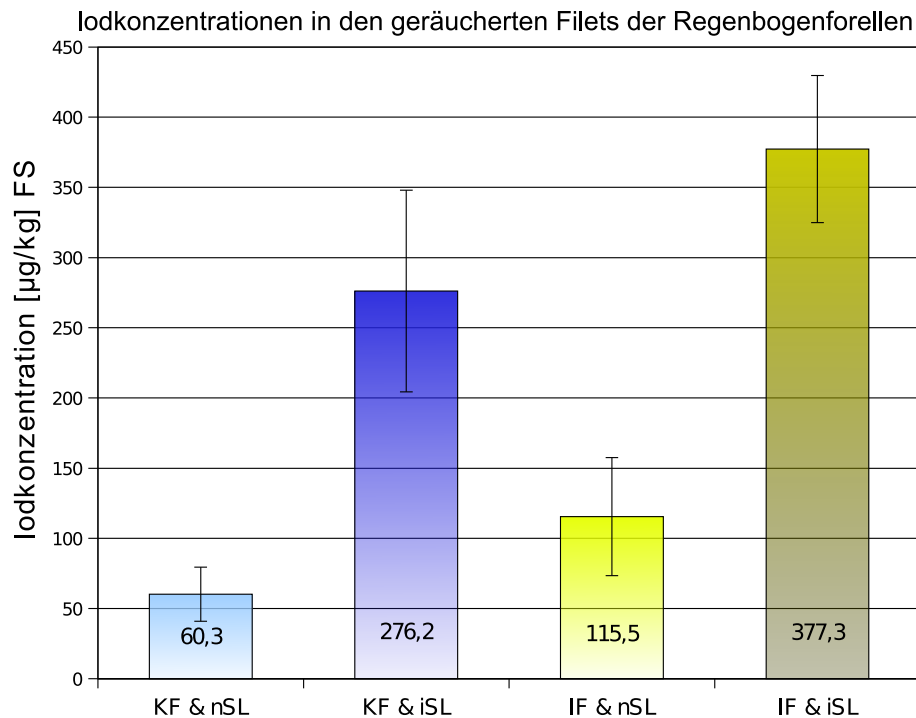


Abbildung 5.11: Iodkonzentrationen in den geräucherten Filets der Regenbogenforellen. KF: Kontrollfische, IF: Iodfische, nSL: normale Salzlake, iSL: iodhaltige Salzlake; $n = 10$. Bemerkenswert sind die deutlich höheren Iodkonzentrationen der Fische aus der iodhaltigen Salzlake. Bei den Kontrollfischen kam es durch die Verwendung der iodhaltigen Salzlake zu einer Steigerung um etwa 360%, bei den Iodfischen etwa zu 230%.

Bei den Iodfischen aus nSL konnte ein um circa 85%, bei denen aus iSL etwa 450% höherer Iodgehalt in den Restkörpern, verglichen mit denen der rohen Fische, festgestellt werden.

Die Iodkonzentrationen der geräucherten Haut und der Restkörper liegen bei allen Gruppen deutlich über den Iodkonzentrationen der Filets. Dieses Verhältnis in der Iodkonzentration der Bestandteile ist damit analog zu den Bestandteilen aus den rohen Fischen.

5.6 Humanernährungsversuch

In einem neuntägigen Ernährungsversuch wurde untersucht, ob durch den Verzehr von geräucherten Fischfilets eine bessere Iodversorgung im Mensch erzielt werden kann. Zudem sollte eine Antwort auf die Frage, welchen Einfluss die Fütterung, sowie das Einlegen der Fische in unterschiedliche Salzlaken vor dem eigentlichen Räucherungsprozess hat, gefunden werden. Vier Probandengruppen bekamen Filets, die durchschnittliche Iodkonzentrationen von 60,3 (KF nSL), 276,2 (KF iSL), 115,5 (IF nSL) bzw. 377,3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ FS (IF iSL) hatten, zum Verzehr. An Tag 3 und 6 des Versuchs wurde zur Mittagszeit ein kaltes, geräuchertes Filet von 180-200 g verzehrt. Aus den täglichen Morgenurinproben der Probanden wurde die Iod- und Creatininkonzentration bestimmt.

Erwartet wurde eine Steigerung der Iodurinausscheidung an den Tagen nach dem Fischverzehr (Tag 4 und 7), der mit der Höhe der aufgenommenen Iodmenge korrelieren sollte.

Auffällig waren starke individuelle Schwankungen in der Iodausscheidung der einzelnen Probanden und große Steuungen innerhalb einer Gruppe. Auch Kuznik (2001) hatte in ihrem Ernährungsversuch starke individuelle Schwankungen beobachtet.

Einen starken, wie erwarteten Anstieg an Tag 4 und 7 konnte bei den Gruppennittelwerten nicht beobachtet werden. Hingegen kam es bei den Einzelwerten von sieben Probanden aus unterschiedlichen Gruppen an Tag 4 zu einer Steigerung der Iodausscheidung um mindestens 22,0 und maximal 99,9 μg Iod/g Creatinin.

Eine Steigerung konnte an Tag 7 gegenüber Tag 6 bei neun Personen gefunden werden. Sie betrug mindestens 16,0 und maximal 95,0 μg Iod/g Creatinin. Zwischen der aufgenommenen Iodmenge mit den Fischfilets und der ausgeschiedenen Iodmenge im Urin der Probanden konnte kein Zusammenhang hergestellt werden.

Die mittlere Iodausscheidung der IF nSL-Gruppe war bereits an Tag 1 höher als die der KF nSL und KF iSL-Gruppen. Auch die IF iSL-Gruppe schied bereits an den Tagen vor dem Fischverzehr (Tag 1 und 2) mehr Iod als alle anderen Gruppen aus. Die Iodausscheidung der IF iSL-Gruppe war an Tag 5 hoch signifikant über denen der

KF nSL und KF iSL-Gruppen. An Tag 6 war diese Mehrausscheidung höchst signifikant und zusätzlich hoch signifikant über der Iodausscheidung der IF nSL-Gruppe. An Tag 8 schied die IF iSL-Gruppe gegenüber der KF nSL und IF nSL-Gruppe signifikant und gegenüber der KF iSL-Gruppe hoch signifikant mehr Iod aus. Auch die gesamte Iodmenge, die von dieser Gruppe während des Versuchs gegenüber den anderen Gruppen ausgeschieden wurde, war signifikant (IF nSL) bzw. hoch (KF nSL) und höchst (KF iSL) signifikante mehr. Ob dieser Unterschied durch die verzehrten Fische bedingt ist scheint fraglich, da diese Gruppe bereits in den Tagen vor dem ersten Fischverzehr mehr Iod als die anderen Gruppen ausschied.

Aus diesem Grund konnte auf die Frage, welchen Einfluss die Iodfütterung und das Einlegen der Fische in iodhaltige Salzlake auf die Iodversorgung beim Mensch hat, keine abschließende Antwort gefunden werden, zumal die Probanden, welche die Kontrollfische aus iodhaltiger Salzlake verzehrt hatten, die geringste Iodmenge über den gesamten Versuchszeitraum ausschieden.

Die Iodkonzentration in den geräucherten Fischfilets war scheinbar nicht hoch genug, um einen deutlichen Anstieg der Iodurinausscheidung nach dem Verzehr der Fische hervorzurufen.

Burkard (2002) konnte in ihrem Ernährungsversuch, bei dem 250 g Filet von algen-supplementierten Elsässer Saiblingen verzehrt wurde, eine Steigerung der Iodurinausscheidung um 45% erreichen. Diese Fische hatten eine Iodkonzentration von 450 μg Iod/kg FS. Schmid (2003) erreichte eine um 75% höhere Iodausscheidung durch den Verzehr von 200 g Kabeljau (1410 μg Iod/kg FS). In beiden Fällen wurden die Fische abends gegessen.

In dem hier vorliegenden Versuch wurden die Fische zur Mittagszeit verzehrt. Es ist möglich, dass der Abstand zwischen den Fischmahlzeiten und der Urinsammlung zu lange war und ein Großteil des aufgenommenen Iods schon vor der Urinsammlung wieder ausgeschieden wurde. Dies kann ebenfalls ein Grund für die nicht beobachtbare deutliche Erhöhung der Iodausscheidung an den Tagen nach dem Fischverzehr sein.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, inwieweit durch die Fütterung eines Fischfutters, das mit der maximal zulässigen Menge an anorganischem Iod supplementiert war, unter Praxisbedingungen eine Iodanreicherung in verschiedenen Süßwasserfischen erzielt werden kann. Hierfür wurde in Zusammenarbeit mit zwei privaten Fischzüchtern sowie dem Institut für Fischerei der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft ein sechsmonatiger Feldfütterungsversuch durchgeführt. Vier verschiedene Süßwasserfischarten aus der Familie der Salmonidae erhielten ein Futter, das mit 20 mg Iod/kg in Form von Calciumiodat angereichert war.

Es wurde des Weiteren untersucht, wie sich der Iodgehalt von in Bayern freilebenden Fischen zu den Fischen aus den Zuchtbetrieben unterscheidet. Nach sechsmonatiger Fütterung waren in den Filets der iodgefütterten Zuchtfische höchst signifikant größere Iodkonzentrationen als in denen der wilden Bachforellen enthalten.

Die Iodgehalte der verschiedenen Salmonidenarten unterschieden sich sowohl artspezifisch als auch individuell. Die höchsten Iodkonzentrationen wurden bei den Seesaiblingen gefunden, gefolgt von den See-, Bach- und Regenbogenforellen.

Eine weitere Fragestellung der vorliegenden Arbeit war, wie sich das Iod innerhalb der Fischkörper verteilt. Bei allen untersuchten Fischgruppen wurden sehr hohe Iodkonzentrationen in den Kiemen gefunden. Diese lagen deutlich über den Konzentrationen der anderen Fischbestandteile. Eine ebenfalls recht hohe Iodkonzentration war in den Gonaden und Eiern der geschlechtsreifen, weiblichen Bachforellen enthalten. Auch die Innereien, die Restkörper sowie die Haut der Fische hatten höhere Iodkonzentrationen als die Filets.

Da das Räuchern von Fischen eine sehr beliebte Art der Veredelung ist, wurde in der vorliegenden Arbeit bei Regenbogenforellen zusätzlich untersucht, welchen Einfluss das Einlegen in iodhaltige Salzlake vor dem Räucherungsprozess auf den Iodgehalt hat. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass es zu einem höchst signifikanten Anstieg der Iodkonzentration durch die Verwendung von iodhaltiger Salzlake kommt. Bei den Kontrollfischen betrug diese Steigerung 360%, bei den Iodfischen waren es rund 230%. Damit ist die Verwendung von iodhaltiger Salzlake eine sehr effektive Maßnahme, um den Iodgehalt in den Fischen zu erhöhen. Auch die Fütterung mit dem iodsupplementierten Futter hatte einen positiven Effekt auf den Iodgehalt der Filets. Die iodgefütterten Regenbogenforellen aus iodhaltiger Salzlake hatten eine 37% höhere Iodkonzentration in den geräucherten Filets als die Kontrollfische aus iodhaltiger Salzlake. Somit ist die Iodsupplementierung des Fischfutters eine sinnvolle Möglichkeit, um die Iodkonzentrationen in den Filets zu erhöhen, auch wenn durch das Einlegen in iodhaltige Salzlake weitaus größere Erhöhungen erzielt werden konnten.

Ob durch den Verzehr der geräucherten Filets eine bessere Iodversorgung im Menschen erzielt werden kann, wurde im Rahmen eines Humanernährungsversuchs untersucht. Es sollte beurteilt werden, welchen Einfluss die Fütterung der Fische mit und ohne Iodzusatz, sowie das Einlegen derselben in iodhaltige und normale Salzlake auf die Iodausscheidung der Probanden hat. Die Iodausscheidungen der Probanden waren sehr unterschiedlich und die Streuungen sehr hoch. An den Tagen nach dem Fischverzehr kam es bei einigen Probanden zu einer Erhöhung der Iodausscheidung im Urin, jedoch konnten keine statistisch signifikanten Erhöhungen der unterschiedlichen Probandengruppen beobachtet werden.

Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass unter Feldbedingungen durch die Verwendung eines Fischfutters, das mit dem maximal zulässigen Iodgehalt angereichert war, eine Iodanreicherung von Süßwasserfischen aus der Familie der Salmonidae möglich ist. Durch die Verwendung von iodhaltiger Salzlake konnte bei Räucherfischen eine deutliche Erhöhung der Iodkonzentration in den Fischfilets erreicht werden, womit dies eine sehr effektive Maßnahme ist, um den Iodgehalt in diesen Fischen zu erhöhen.

Summary

Stefanie Daub

Analysis of iodine content in freshwater fish. Field study with the maximum allowed concentration of iodine in fish feed.

The focus of the present study is the impact of feed on the iodine concentration in freshwater fish under field conditions. Therefore, the feed was enriched with the maximum amount of iodine allowed by law. To reveal the impact of feeding, a six month feeding experiment was arranged in cooperation with two fish farmers and the Institut für Fischerei in Starnberg from the Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. This study covers the feeding with a concentration of 20 mg Iodine/kg in terms of calcium iodate of four different fish species from the salmon family. Furthermore, the iodine concentration differences between fish living in the wild and farmed fish should be researched.

After six months, the iodine content in the fish filets was significantly higher than the concentration of fish living in the wild. Additionally, the concentration of iodine varied between the different species and individuals. The highest concentration was found in charr followed by lake trout, brown trout and rainbow trout. Another topic of the present project was the distribution of iodine within the fish bodies. In all species a higher iodine concentration was found in the gills than any other part. Also the concentrations in the gonads and eggs of the mature female brown trout were

particularly high. The bowels, the skin and the rest of the fish bodies all had higher iodine concentrations than the filets.

Smoking fish is a widespread method in fish processing. Specifically, the influence of brine containing iodized salt on rainbow trout was studied in this process. The fish were put in the brine before smoking. An evident increase in the iodine concentration could be observed when iodized salt was used. Iodine concentration in control group increased about 360%, in the iodine fed fish 230%. Thus, the usage of iodized brine is an effective method to raise the concentration in smoked fish. Also, the feed has a positive effect on the iodine concentration in the fish. In rainbow trout fed with iodinated feed, the concentration in the filets was 37% above those of the normally fed rainbow trout. Therefore, the iodine supplementation of fish feed is an alternative method to improve the iodine content in filets, although higher increase can be realized by the usage of iodized brine.

Besides the concentration in fish, the influence on iodine uptake by consumption of smoked fish and their effect on iodine supply in humans was studied. Thereby, the impact of different brines was examined. The urinary excretion of iodine showed large individual variations. Within the days after fish consumption, no statistically significant correlation between the different subject groups and thus a better iodine supply could be observed.

Fundamentally it has been shown under field conditions, that by using fish feed enriched with maximum allowed iodine supplementation an increase of iodine is possible in freshwater fish from the salmon family. By using iodinated brine a significant increase in fish filets could be achieved rendering this as a very effective method to enrich iodine in smoked fish.

Anhang **A**

Tabelle A.1: Iodausscheidung im Urin der einzelnen Probanden an den Tagen des Humanernährungsversuchs in [μg Iod/g Creatinin]

Proband	Tag 1	Tag 2	Tag 3 Fisch	Tag 4	Tag 5	Tag 6 Fisch	Tag 7	Tag 8	Tag 9
1	34,4	27,2	31,9	34,4	48,0	22,2	40,8	43,1	55,0
2	28,5	77,8	101,4	128,1	29,5	45,8	33,8	35,6	88,9
3	72,2	63,6	72,0	126,1	50,5	32,9	75,1	54,1	81,5
4	33,6	55,7	63,1	53,1	40,0	25,7	120,7	66,3	17,5
5	47,0	58,6	71,8	42,2	22,7	32,9	35,1	72,8	20,2
6	112,6	100,9	86,6	74,1	65,3	65,7	68,7	105,6	84,1
7	53,6	66,6	33,0	106,4	55,1	27,5	39,3	32,0	52,5
8	47,8	39,9	57,1	62,9	65,2	48,2	50,0	28,0	27,9
9	110,2	49,6	53,0	24,9	40,4	65,7	51,7	62,1	37,2
10	34,1	39,4	44,9	28,2	26,3	57,2	36,2	57,4	49,8
11	76,5	58,5	36,2	24,6	36,8	66,3	88,7	48,1	21,0
12	41,5	21,0	134,4	13,0	41,0	35,3	34,8	85,9	44,9
13	54,7	37,3	91,9	86,4	71,6	77,8	55,7	38,1	64,4
14 \diamond	102,7	123,6	111,6	133,6	89,0	56,4	88,7	70,5	116,0
15 *	123,5	183,5	106,3	104,2	91,2	152,6	162,8	80,5	105,0
16	59,1	42,5	64,6	21,3	34,6	42,1	16,0	28,4	88,9
17	47,4	49,2	62,1	71,2	83,9	62,4	73,7	80,2	61,4
18	85,1	39,2	48,5	20,3	43,7	51,9	45,9	50,9	23,0
19	72,2	71,8	79,8	109,6	79,4	109,1	100,2	109,5	107,2
20 *	129,2	215,8	87,1	66,4	117,5	68,9	95,2	82,8	119,2
21	106,5	82,9	96,4	125,8	89,0	99,4	84,6	77,9	99,5
22	56,8	103,7	80,4	73,4	65,4	119,0	156,4	102,7	74,3
23	48,0	45,3	43,7	35,9	36,0	38,1	54,5	54,2	55,8
24 \diamond	95,8	122,9	135,6	82,7	70,5	132,7	75,3	111,1	58,5
25	101,3	63,9	99,9	65,7	141,8	141,8	197,1	103,2	122,3
26	144,9	45,9	60,4	160,3	130,8	174,5	92,6	160,0	82,9

Proband 1-6 Kontrollfisch & normale Salzlake

Proband 7-12 Kontrollfisch & iodhaltige Salzlake

Proband 13-19 Iodfisch & normale Salzlake

Proband 20-26 Iodfisch & iodhaltige Salzlake

* Probanden nahmen täglich L-Thyroxin und Iodid zu sich

\diamond Probanden nahmen täglich L-Thyroxin zu sich

Prob. Nr.: _____

Fragebogen zur Humanernährungsstudie „Ioduntersuchungen in Süßwasserfischen“

Zum Proband:

Geschlecht: weiblich männlich

Alter: _____ Größe: _____ Gewicht: _____

Raucher: nein ja falls ja: < 10 Zigaretten / Tag > 10 Zigaretten / TagHaben/ Hatten Sie eine Schilddrüsenerkrankung? ja nein

Art der Erkrankung: _____

Nehmen Sie regelmäßig Medikamente zur Therapie? _____

Gibt / Gab es in Ihrer Familie bekannte Schilddrüsenerkrankungen? ja nein

Art der Erkrankungen: _____

Essgewohnheiten: Bitte bei monatlich/wöchentlich ungefähre Anzahl angeben

Wie oft verzehren Sie Fisch?

 nie oder selten (< 1x im Monat) monatlich (ca. ___x) wöchentlich (ca. ___x) täglich

Welchen Art von Fisch bevorzugen Sie?

 Meeresfisch: _____ Süßwasserfisch: _____

Nehmen Sie regelmäßig Iodtabletten oder iodhaltige Nahrungsergänzungsmittel zu sich?

 ja nein

wenn ja: wie häufig _____ wie viele _____ welche? _____

Verwenden Sie iodiertes Speisesalz? ja nein weiß ich nichtEnthält Ihr Brot iodiertes Speisesalz? ja nein weiß ich nicht

Wie häufig verzehren Sie Fertigprodukte?

 nie oder selten (< 1x im Monat) monatlich (ca. ___x) wöchentlich (ca. ___x) täglichVerzehren Sie mehr als 0,5 Liter Milch oder Milchprodukte pro Tag? ja nein

Wie oft verzehren Sie Eier?

 nie oder selten (< 1x im Monat) monatlich (ca. ___x) wöchentlich (ca. ___x) täglichErnähren Sie sich vegetarisch? ja nein

Wie oft verzehren Sie Fleisch und Wurstwaren?

 nie oder selten (< 1x im Monat) monatlich (ca. ___x) wöchentlich (ca. ___x) täglich

Wieviel Alkohol konsumieren Sie? (1 Einheit entspricht 0,5l Bier oder 0,2l Wein)

 kein selten (<1x Monat) monatlich (ca. ___ Einheiten) wöchentlich (ca. ___ Einheiten) täglich (ca. ___ Einheiten) keine Angabe

Literaturverzeichnis

- Als, C., Haldimann, M., Bürgi, E., Donati, F., Gerber, H. und Zimmerli, B. (2003): Swiss pilot study of individual seasonal fluctuations of urinary iodine concentration over two years: is age-dependency linked to the major source of dietary iodine? *Eur J Clin Nutr*, 57(5):636–646.
- Amachi, S., Kasahara, M., Hanada, S., Kamagata, Y., Shinoyama, H., Fujii, T. und Muramatsu, Y. (2003): Microbial participation in iodine volatilization from soils. *Environ Sci Technol*, 37(17):3885–3890.
- Andersen, S., Hvingel, B. und Laurberg, P. (2002): Iodine content of traditional Greenlandic food items and tap water in East and West Greenland. *Int J Circumpolar Health*, 61(4):332–340.
- Andersson, M., de Benoist, B., Darnton-Hill, I. und Delange, F. (Herausgeber) (2007): *Iodine Deficiency in Europe: A continuing public health problem*. WHO.
- Anke, M. (2007): Iod. In *Handbuch der Lebensmitteltoxikologie. Belastungen Wirkungen, Lebensmittelsicherheit, Hygiene.*, herausgegeben von Dunkelberg, H., Gebel, T. und Hartwig, A., Seiten 2317–2379. WILEY-VCH Verlag GmbH & co. KGaA, 5. Edition.

- Anke, M., Groppel, B. und Bauch, K. (1993): Iodine in the food chain. In *Iodine Deficiency in Europe. A Continuing Concern.*, herausgegeben von Delange, F., Dunn, J. und Glinoe, D., Band 241 von *A: Life Sciences*, Seiten 151–158. Plenum Press, New York.
- Arbeitskreis Jodmangel (2004): *Iodmangel und Iodversorgung in Deutschland. Aktuelles zum derzeitigen Versorgungsstand und Handlungsbedarf.*
- Arbeitskreis Jodmangel (2007): *Iodversorgung aktuell. Daten und Fakten zum Stand des Iodmangels und der Iodversorgung in Deutschland.* www.jodmangel.de.
- de Benoist, B., Andersson, M., Egli, I., Takkouche, B. und Allen, H. (Herausgeber) (2004): *Iodine status worldwide. WHO Global Database on Iodine Deficiency.* WHO.
- de Benoist, B., Burrow, G. und Schultink, W. (Herausgeber) (2007): *Assessment of iodine deficiency disorders and monitoring their elimination; a guide for Programme managers.* WHO, 3. Edition.
- de Benoist, B. und Delange, F. (2002): Iodine deficiency: current situation and future prospects. *Sante*, 12(1):9–17.
- BfR (2004a): Nutzen und Risiken der Iodprophylaxe in Deutschland. , Bundesinstitut für Risikobewertung.
- BfR (2004b): Risikobewertung von Iod. In *Verwendung von Mineralstoffen in Lebensmitteln, Toxikologische und ernährungsphysiologische Aspekte, Teil II*, herausgegeben von Domke, A., Großklaus, R., Niemann, B., Przyrembel, H., Richter, K., Schmidt, E., Weißenborn, A., Wörner, B. und Ziegenhagen, R., Seiten 201–240. Bundesinstitut für Risikobewertung.
- BfR, A. (2006): Iod, Folsäure und Schwangerschaft - Ratschläge für Ärzte. , Bundesinstitut für Risikobewertung und Arbeitskreis Jodmangel.

- BgVV (2001): Iodanreicherung von Lebensmitteln in Deutschland. , Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin.
- Bohnet, H. (2007): Iodmangel und Iodversorgung in der Schwangerschaft und Stillzeit. Maßnahmen, Prophylaxeerfolge und Probleme. *Prävention und Gesundheitsförderung*, 2(3):175–178.
- Brown-Grant, K. (1961): Extrathyroidal Iodide Concentrating Mechanisms. *Physiol. Rev.*, 41:189–213.
- Burkard, S. (2002): Iodanreicherung im Süßwasserfisch durch Supplementierung mit Meeresalgen. Ein Beitrag zur Verbesserung der Iodversorgung des Menschen. *Vet.Med. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München.*
- Bürgi, H. und Helbling, B. (1996): Methods of iodine supplementation. What is best where? *In: The Thyroid and Iodine. European Thyroid Symposium.*, Seiten 51–61.
- Bürgi, H., Schaffner, T. und Seiler, J. (2001): The Toxicology of Iodate: A Review of the Literature. *Thyroid*, 11(5):449–456.
- Carpenter, L. (2003): Iodine in the marine boundary layer. *Chem Rev*, 103(12):4953–4962.
- Dahl, L., Johansson, L., Julshamn, K. und Meltzer, H. M. (2004): The iodine content of Norwegian foods and diets. *Public Health Nutr*, 7(4):569–576.
- Davidsson, L. (1999): Are vegetarians an ‘at risk group‘ for iodine deficiency ? *British Journal of Nutrition*, 81(1):3–4.
- Delange, F. (1994): The Disorders Induced by Iodine Deficiency. *Thyroid*, 4(1):107–128.
- Diosady, L., Alberti, J., Venkatesh Mannar, M. und Fitz-Gerald, S. (1998): Stability of iodine in iodized salt used for correction of iodine-deficiency disorders II. *Food Nutr Bull*, 19(3):239–49.

- Dunn, J. T. (1993): Techniques for Measuring Urinary Iodine - An Update. *IDD Newsletter*, 9(4).
- Dunn, J. T. (1998): What's happening to our iodine? *Journal Of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 83(10):3398–3400.
- Dunn, J. T., Crutchfield, H. E., Gutekunst, R. und Dunn, A. D. (1993): Two simple methods for measuring iodine in urine. *Thyroid*, 3(2):119–123.
- Eckhoff, K. und Maage, A. (1997): Iodine Content in Fish and Other Food Products from East Africa Analyzed by ICP-MS. *J Food Comp Analysis*, 10(3):270–282.
- ESFA (2005): Opinion of the Scientific Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed on the request from the Commission on the use of iodine in feedingstuffs. *The EFSA Journal*, 168:1–42.
- Flachowsky, G., Schöne, F. und Jahreis, G. (2006): Zur Iodanreicherung in Lebensmitteln tierischer Herkunft. *Ernährungs-Umschau*, 53(1):17–21.
- Franke, K., Schöne, F., Berk, A., Leiterer, M. und Flachowsky, G. (2008): Influence of dietary iodine on the iodine content of pork and the distribution of the trace element in the body. *Eur J Nutr*, 47(1):40–46.
- Gorbman, A. (1969): Thyroid funktion and its control in fishes. In *Fish Physiology*, herausgegeben von Hoar, W., Randall, D. und Breit, J., Seiten 241–274.
- Grimminger, S. (2005): Zum Iodbedarf und zur Iodversorgung der Haus- und Nutztiere und des Menschen. *Vet.Med. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München*.
- Groppel, B. (1987): Iodmangelerscheinungen, Iodversorgung und Iodstatus des Wierkäuers (Rind, Schaf, Ziege). *Promotion B, Wissenschaftlicher Rat der Karl-Marx-Universität, Leipzig*.

- Groppel, B., Rambeck, W. und Gropp, J. (1991): Iodanreicherung in Organen und Geweben von Mastküken nach Iodsupplementation des Futters. In *Mengen- und Spurenelemente, 11. Arbeitstagung.*, herausgegeben von Anke, M., Groppel, B., Gürtler, H., Grün, M., Lombeck, I. und Schneider, H.-J., Seiten 300–308. Verlag MTV Hammerschmidt Jena.
- Großklaus, R. (2007): Nutzen und Risiko der Iodprophylaxe. *Prävention und Gesundheitsförderung*, 2(3):159–166.
- Großklaus, R. (2008): Iod-Risiko oder Nutzen? *Zeitschrift VFED*, 106:6–11.
- Gärtner, R. (2000): Gibt es Risiken der Iodmangelprophylaxe? *Ernährungs-Umschau*, 47(3):86–91.
- Gärtner, R. und Dugrillon, A. (1998): Vom Iodmangel zur Struma, Pathophysiologie der Iodmangelstruma. *Der Internist*, 39(6):566–573.
- Gärtner, R., Manz, F. und Grossklaus, R. (2001): Representative data of iodine intake and urinary excretion in Germany. *Exp Clin Endocrinol Diabetes*, 109(1):2–7.
- Hampel, R., Beyersdorf-Radeck, B., Below, H., Demuth, M. und Seelig, K. (2001): Iodidurie bei Schulkindern in Deutschland 1999 im Normbereich. *Med Klin (München)*, 96(3):125–128.
- He, M. L., Hollwich, W. und Rambeck, W. A. (2002): Supplementation of algae to the diet of pigs: a new possibility to improve the iodine content in the meat. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*, 86(3-4):97–104.
- Heseker, H. (1999): Iod Funktionen, Physiologie, Stoffwechsel, Empfehlungen und Versorgung in der Bundesrepublik Deutschland. *Ernährungs-Umschau*, 46(2):55–59.
- Hetzel, B. und Maberly, G. (1986): Iodine. In *Trace elements in Human and Animal Nutrition*, herausgegeben von Mertz, W., Band 2, Seiten 139–208. Academic Press, INC., London, New York, Toronto, Sydney, San Fransisco, 5. Edition.

- Hetzel, B. S. und Dunn, J. T. (1989): The iodine deficiency disorders: their nature and prevention. *Annu Rev Nutr*, 9:21–38.
- Hoc, S. (2003): Latente Hypo- / Hyperthyreose: Wann Therapie, wann nur Kontrolle? *Deutsches Ärzteblatt*, 100 (45):A-2966.
- Hoffmann, R. (2005): *Fischkrankheiten*. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- Hornauer, W. (2001): Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit von Iod aus Algen (*Laminaria* sp.) bei Milchkühen. *Vet.Med. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München*.
- Jahreis, G., Leiterer, M. und Fechner, A. (2007): Iodmangelprophylaxe durch richtige Ernährung. Der Beitrag von Milch, Seefisch und Iodsalz zur Iodversorgung in Deutschland. *Prävention und Gesundheitsförderung*, 2(3):179–183.
- Janssen, O. (2004): Molekularbiologische Grundlagen von Schilddrüsenerkrankungen. In *Schilddrüsenerkrankungen. Grundlagen-Diagnostik-Therapie.*, herausgegeben von Gärtner, R., Seiten 104–134. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart.
- Kaiho, T. (2008): Industrial production and applications of iodine. *IDD Newsletter*, 27(1):12–13.
- Kantoci, S. (2008): Anreicherung von Iod und Omega-3-Fettsäuren in der Karpfenproduktion durch Algen im Fischfutter. *Vet.Med. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München*.
- Karl, H., Basak, S., Ziebell, S. und Quast, P. (2005): Changes of the Iodine Content in Fish during Household Preparation and Smoking. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau*, 101(10).
- Karl, H. und Münkner, W. (1999): Iod in marinen Lebensmitteln. *Ernährungs-Umschau*, 46(8):288–291.

- Karl, H., Münkner, W., Krause, S. und Bagge, I. (2001): Determination, spatial variation and distribution of iodine in fish. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau*, 97(3):89–96.
- Kaufmann, S. und Rambeck, W. (1998): Iodine supplementation in chicken, pig and cow feed. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.*, 80:147–152.
- Kaufmann, S., Wolfram, G., Delange, F. und Rambeck, W. (1998): Iodine supplementation of laying hen feed: A supplementary measure to eliminate iodine deficiency in humans? *Z. Ernährungswiss.*, 37:288–293.
- Knepel, W. (2005): Schilddrüsentherapeutika. In *Allgemeine und spezielle Pharmakologie und Toxikologie*, herausgegeben von Aktories, Förstermann, Hoffmann und Starke, Seiten 715–725. Elsevier GmbH, Urban & Fischer Verlag, 9. Edition.
- Krajcovicová-Kudlácková, M., Bucková, K., Klimes, I. und Seboková, E. (2003): Iodine deficiency in vegetarians and vegans. *Ann Nutr Metab*, 47(5):183–185.
- Kuznik, M. (2001): Fütterung von Süßwasserfischen mit Meeresalgen als natürliche Iodquelle. *Vet. Med. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München*.
- Köhrle, J. (2006): Iod. Immer noch unterversorgt. *Pharmazeutische Zeitung*, 151(1):32–35.
- Köhrle, J. und Schmutzler, C. (2004): Iodstoffwechsel, Schilddrüsenhormonsynthese und -sekretion. In *Schilddrüsenerkrankungen. Grundlagen-Diagnostik-Therapie.*, herausgegeben von Gärtner, R., Seiten 16–51. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart.
- Laurberg, P., Bülow Pedersen, I., Knudsen, N., Ovesen, L. und Andersen, S. (2001): Environmental Iodine Intake Affects the Type of Nonmalignant Thyroid Disease. *Thyroid*, 11(5):457–469.

- Laurberg, P., Nøhr, S. B., Pedersen, K. M., Hreidarsson, A. B., Andersen, S., Pedersen, I. B., Knudsen, N., Perrild, H., Jørgensen, T. und Ovesen, L. (2000): Thyroid disorders in mild iodine deficiency. *Thyroid*, 10(11):951–963.
- Lee, S. M., Lewis, J., Buss, D. H., Holcombe, G. D. und Lawrance, P. R. (1994): Iodine in British foods and diets. *Br J Nutr*, 72(3):435–446.
- Leloup, J. und Fontaine, M. (1960): Iodine metabolism in lower vertebrates. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 86(2):316–353.
- Lux, R. und Walter, U. (2005): Präventionsstrategien durch Anreicherung von Grundnahrungsmitteln mit Iod, Fluorid und Folsäure: eine Chronologie. *Ernährungs-Umschau*, 52(11):444–447.
- Meng, W. und Scriba, P. (2002): Iodversorgung in Deutschland. *Deutsches Ärzteblatt*, 99(39):B 2185–B 2189.
- Merke, F. (1965): Die Eiszeit als primordiale Ursache des endemischen Kropfes. *Schweizerische Medizinische Wochenzeitschrift*, 95(36):1183–1192.
- Montag, A. und Grote, B. (1981): Untersuchungen zur Iod-Brom-Relation in Lebensmitteln. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und-Forschung*, 172(2):123–128.
- NVS II (2008): Iod. In *Nationale Verzehrs Studie II. Ergebnisbericht, Teil 2. Die bundesweite Befragung zur Ernährung von Jugendlichen und Erwachsenen.*, Seiten 138–141. Max-Rubner-Institut. Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel.
- Pfannenstiel, P. (1987): Iod und Schilddrüse. *Verhandlungsbericht des 6. Wiesbadener Schilddrüsengesprächs*, Seiten 1–5.
- Pickardt, C. (1994): Iodinduzierte Hyperthyreose unter Berücksichtigung der Autonomie der Schilddrüse. In *Notwendigkeit der Iodsalzprophylaxe*, herausgegeben von Großklaus, R. und Somogyi, A. Medizin Verlag München.

- Rambeck, W., Kaufmann, S., Feng, J., Hollwich, W. und Arnold, R. (1997): Verbesserung der Iodversorgung des Menschen durch Iodierung von Schweinefutter. *Tierärztliche Praxis*, 25:312–315.
- Reiners, C., Wegscheider, K., Schicha, H., Theissen, P., Vaupel, R., Wrbitzky, R. und Schumm-Draeger, P.-M. (2004): Prevalence of thyroid disorders in the working population of Germany: ultrasonography screening in 96,278 unselected employees. *Thyroid*, 14(11):926–932.
- Remer, T. (2007): Iodversorgung bei Kindern und Jugendlichen. Maßnahmen, Probleme und Erfolge im Wachstumsalter. *Prävention und Gesundheitsförderung*, 2(3):167–173.
- Rendl, J., Juhran, N. und Reiners, C. (2001): Thyroid volumes and urinary iodine in German school children. *Exp Clin Endocrinol Diabetes*, 109(1):8–12.
- Reutter, F. und Eugster, C. (1985): Akuter Iodismus mit Sialadenitis, allergischer Vaskulitis und Konjunktivitis nach Verabreichung iodhaltiger Kontrastmittel. *Schweizerische Medizinische Wochenzeitschrift*, 115(46):1646–1651.
- Richter, G. (1995): Einfluß der Iodversorgung der Legehennen auf den Iodgehalt im Ei. In *Mengen- und Spurenelemente. 15. Arbeitstagung.*, herausgegeben von Anke, M., Bergmann, H., Bitsch, R., Dorn, W., Flachowsky, G., Gleis, M., Groppe, B., Grün, M., Hütler, H., Lombeck, I., Lickas, B., Meißner, D., Merbach, W., Müller, M. und Schneider, H.-J., Seiten 457–464. Verlag Harald Schubert, Leipzig.
- Roberts, R. (2001): *Fish Pathology*. W.B. Saunders, 3. Edition.
- Saller, B., Fink, H. und Mann, K. (1998): Kinetics of acute and chronic iodine excess. *Exp Clin Endocrinol Diabetes*, 106 Suppl 3:S34–S38.
- Saller, B. und Mann, K. (1995): Iodinduzierte Hyperthyreose. *Der Nuklearmediziner*, 18(5):266–274.

- Sandell, E. und Kolthoff, I. (1937): Mikrodetermination of iodine by a catalytical method. *Mikrochemica Acta*, 1:9–25.
- Schlotfeldt, H. (1985): Das endokrine System. In *Grundlagen der Fischpathologie*, Seiten 61–97. Roberts, R., Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg.
- Schmid, S. (2003): Fütterungsversuch mit iod- und omega-3-fettsäurehaltigen Algen an Süßwasserfischen. *Vet.Med. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München*.
- Schmidter, A. (2000): Meeresalgen als natürliche Iodquelle in der Fütterung von Süßwasserfischen. Möglichkeit zur Verbesserung der Iodversorgung des Menschen. *Vet.Med. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München*.
- Schumm-Draeger, P. (2006): Latente und manifeste Schilddrüsenfunktionsstörungen häufig erst spät erkannt. *Klinik für Endokrinologie, Diabetologie und Angiologie, Klinikum München-Bogenhausen*.
- Schumm-Dräger, P. und Feldkamp, J. (2007): Schilddrüsenkrankheiten in Deutschland. Ausmaß, Entwicklung, Auswirkungen auf das Gesundheitswesen und Präventionsfolge. *Prävention und Gesundheitsförderung*, 2(3):153–158.
- Scriba, P., Hesecker, H. und Fischer, A. (2007): Iodmangel und Iodversorgung in Deutschland. Erfolgreiche Verbraucherbildung und Prävention am Beispiel von iodiertem Speisesalz. *Prävention und Gesundheitsförderung*, 2(3):143–148.
- Slebodziński, A. B. (2005): Ovarian iodide uptake and triiodothyronine generation in follicular fluid. The enigma of the thyroid ovary interaction. *Domest Anim Endocrinol*, 29(1):97–103.
- Souci, F., Fachmann, W. und Kraut, H. (2000): Food Consumption and Nutrition Tables. *Medpharm, Scientific Publishers, Stuttgart*, 6.

- Thamm, M. (2007): Bericht zur Iodversorgung deutscher Kinder und Jugendlicher auf Basis der Daten den „Iod-Moduls“ im Rahmen der KiGGS Studie. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, <http://www.bmelv.de>.
- Thamm, M., Ellert, U., Thierfelder, W., Liesenkötter, K.-P. und Völzke, H. (2007): Iodversorgung in Deutschland. Ergebnisse des Iodmonitorings im Kinder- und Jugendgesundheitsurvey (KiGGS). *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, 50:744–749.
- Ungelenk, M. (2000): Algen als Iodquelle in der Legehennenfütterung. Möglichkeit zur Verbesserung der Iodversorgung des Menschen. *Vet.Med. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München*.
- Voigt, K. (2003): Endokrines System. In *Lehrbuch der Physiologie*, herausgegeben von Klinke, R. und Silbernagel, S., Seiten 478–485. Thieme Verlag, 4. Edition.
- Yalçın, S., Kahraman, Z., Yalçın, S., Yalçın, S. S. und Dedeoğlu, H. E. (2004): Effects of supplementary iodine on the performance and egg traits of laying hens. *Br Poult Sci*, 45(4):499–503.
- Yu, K. N., Cheung, T., Young, E. C. und Luo, D. L. (1996): The bioconcentration of ¹³¹I in fresh water fish. *Health Phys*, 71(5):719–722.
- Zimmermann, M., Adou, P., Torresani, T., Zeder, C. und Hurrell, R. (2000): Low dose oral iodized oil for control of iodine deficiency in children. *Br J Nutr.*, 84(2):139–141.
- Zöllner, H., Franke, G., Piek, M., Below, H., Rose, H.-J. und Kramer, A. (2002): Iodurie, Schilddrüsendolumina und TSH-Serumkonzentration bei Erwachsenen in Vorpommern. *Ernährungs-Umschau*, 49(11):424–427.

Tabellenverzeichnis

2.1	Empfehlungen zur Iodversorgung landwirtschaftlicher Nutztiere	29
2.2	Iodgehalte in Fischen und anderen Meerestieren	37
2.3	Empfohlene tägliche Iodzufuhr der DGE und WHO	41
2.4	Beurteilung der Iodversorgung	42
3.1	Ausgangsbedingungen zu Beginn des Feldfütterungsversuchs	47
3.2	Anzahl der geschlachteten Tiere bei der ersten und zweiten Schlachtung	49
3.3	Anzahl der Fische im Räucherversuch	51
3.4	Zeitlicher Ablauf des Humanernährungsversuchs	52
3.5	Anzahl der Probanden im Humanernährungsversuch	52
3.6	Veraschungsprozess	58
4.1	Mittlere Schlachtgewichte	73
4.2	Mittlere Filetgewichte	76
4.3	Prozentuale Gewichtsanteile der Kompartimente am Gesamtgewicht .	77
4.4	Nährstoffgehalte der Fischfutter	78
4.5	Iodkonzentration in den Fischfuttern	79
4.6	Mittlere Iodkonzentration in den Filets der wilden Bachforellen	80
4.7	Mittlere Iodkonzentration an drei Probenentnahmestellen der Filets aus Schlachtung 1	82
4.8	Mittlere Iodkonzentration der Filets aus Schlachtung 2	84

4.9	Mittlere Iodkonzentration der Haut und Innereien	87
4.10	Mittlere Iodkonzentration der Restkörper und Kiemen	87
4.11	Mittlere Iodkonzentration der Gonaden	87
4.12	Absolute Iodmenge in den verschiedenen Kompartimenten	90
4.13	Prozentualer Iodanteil der verschiedenen Kompartimente am Gesamtiodgehalt	90
4.14	Abkürzungen der geräucherten Regenbogenforellen und der verschiedenen Salzlaken	91
4.15	Iodkonzentration in den Filets der Räucherfische: Kontrollfische . . .	93
4.16	Iodkonzentration in den Filets der Räucherfische: Iodfische	93
4.17	Mittlere Iodkonzentration in der Haut der Räucherfische	94
4.18	Mittlere Iodkonzentration in den Restkörpern der Räucherfische . . .	94
4.19	Mittlere Iodausscheidung im Urin der Versuchsgruppen der Humanernährungsstudie	96
4.20	Gesamte Iodausscheidung im Urin (AUC) der Versuchsgruppen während dem Versuchszeitraum des Humanernährungsversuchs	97
A.1	Iodausscheidung im Urin der einzelnen Probanden des Humanernährungsversuchs	126

Abbildungsverzeichnis

2.1	Bedeutung der weltweiten Iodversorgungslage	7
2.2	Schematische Darstellung der Schilddrüsenfollikelverteilung in Fischen	15
3.1	Probenentnahmestellen in den Fischfilets	49
3.2	Eichkurve zur Bestimmung der Iodkonzentration in den Fischen und den Futtern	60
3.3	Eichkurve zur Bestimmung der Iodkonzentration im Urin	64
5.1	Mittlere Schlachtgewichte aus der ersten und zweiten Schlachtung . .	100
5.2	Iodkonzentration in den Fischfuttern	102
5.3	Iodkonzentration in den Filets	103
5.4	Iodkonzentration in den wilden Bachforellen	111
5.5	Iodkonzentration in den geschlechtsreifen Bachforellen	111
5.6	Iodkonzentration in den Kontrollfischen (Regenbogenforellen)	112
5.7	Iodkonzentration in den Regenbogenforellen	112
5.8	Iodkonzentration in den Seeforellen	113
5.9	Iodkonzentration in den Seesaiblingen	113
5.10	Prozentuale Iodverteilung in den Fischbestandteilen der Seesaiblinge .	114
5.11	Iodkonzentration in den Filets der Räucherfische	118

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Prof. Dr. Rambeck für die Überlassung des Themas und seine hilfsbereite und freundliche Betreuung während der Anfertigung meiner Dissertation bedanken.

Herrn Dr. Reiter danke ich für die kompetente und freundliche Unterstützung bei den Schlachtungen, der Räucherung und dem Fangen der Wildfische. Des Weiteren gilt mein Dank den Mitarbeitern des Instituts für Fischerei für ihre tatkräftige Mithilfe.

Herrn Einberger und Herrn Mair möchte ich besonders für die hilfreiche finanzielle Unterstützung während der Laborarbeiten sehr danken.

Frau Dr. Sylvia von Rosenberg danke ich für ihre tolle Unterstützung während der gesamten Arbeit, sei es bei der Organisation des Humanernährungsversuches, inhaltlichen Fragen oder bei der Einführung in die statistische Auswertung.

Ein großes Dankeschön geht an die Mitarbeiter des Labors, besonders an Herrn Werner Hesselbach und Frau Elke Kleiner, ohne ihre Unterstützung und konstruktiven Anregungen wären die Laborarbeiten nicht möglich gewesen.

Recht herzlich möchte ich allen 26 Probanden für ihre zuverlässige Teilnahme am Humanernährungsversuch danken.

Meiner Mutter und meinen Schwestern Christine und Ulrike, sowie Martin Höfling, Christina Beitz, Krishna Kneer, Stephanie und Dr. Georg Höfling möchte ich ganz herzlich für ihr hilfsbereites und sehr wertvolles Korrekturlesen danken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern für das mir entgegengebrachte Vertrauen der letzten Jahre, sowie für ihre sehr hilfreiche finanzielle Unterstützung.

Zuletzt möchte ich in besonderer Weise Martin für seine konstruktiven Vorschläge und unermesslichen Hilfen bei jeglicher Art von Computerfragen und -problemen, die er unter großem Zeiteinsatz geleistet hat, danken.

Von ganzem Herzen danke ich dir für deine Geduld, die Motivationen, dein Vertrauen und für die Zuneigung in allen Lebenslagen in den letzten Jahren.