

UMWELTFORSCHUNGSPLAN  
DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

**Exposition mit Methylquecksilber durch Fischverzehr**

Forschungskennzahl 705 61 416

und

**Etablierung analytischer Methoden zur Bestimmung von  
Methylquecksilber in Fischereierzeugnissen**

Forschungskennzahl UM 07 61 641

**Gemeinsamer Endbericht**

von

Dr. Reinhard Kruse

Dr. Edda Bartelt

Niedersächsisches Landesamt für Verbraucherschutz  
und Lebensmittelsicherheit  
Institut für Fische und Fischereierzeugnisse, Cuxhaven

Im Auftrag des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR)

Februar 2008

## Inhaltsübersicht

<b>Nr.</b>	<b><u>Inhalt</u></b>	<b>Seite</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	
1.1	Das Problem „Fisch und Quecksilber“	3
1.2	Die Spurenanalyse von Quecksilber in Fischen	4
<b>2</b>	<b>Hauptteil</b>	
2.1.1	Die Besonderheiten der Speziesanalytik	6
2.1.2	Die eigene Methode	6
2.1.3	Beleganalysen	12
2.1.4	Bewertung unserer Methode im Vergleich zu anderen Verfahren	13
2.2	Ergebnisse	14
2.2.1	Die Gehalte der Quecksilber-Spezies in Abhängigkeit von makroskopischen Parametern	14
2.2.2	Die internen Speziesrelationen	18
2.3	Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse	23
2.3.1	Bewertung der Ergebnisse nach lebensmittelrechtlichen Vorgaben	25
2.3.2	Bewertung der Ergebnisse nach toxikologischen Maßstäben	27
2.4	Fazit	28
<b>3</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	29
<b>4</b>	<b>Danksagungen</b>	32
<b>5</b>	<b>Zitierte Literatur</b>	33
<b>6</b>	<b>Eigene Vorabveröffentlichungen</b>	34
<b>7</b>	<b>Kontakt / Korrespondenzanschrift</b>	34

# 1. Einleitung

## 1.1 Das Problem „Fisch und Quecksilber“

Der Lebensraum der Fische ist das Wasser. Unter natürlichen, von menschlichem Handeln unbeeinflussten Bedingungen handelt es sich bei Wasser um ein Milieu, in dem Stoffe, die der lebende Organismus benötigt, in z.T. extrem niedrigen Konzentrationen vorkommen. Im Laufe der Evolution hatten daher nur solche Bewohner der aquatischen Räume eine Chance zur Weiterentwicklung, die den Nachteil des Mangels an essentiellen Stoffen durch eine hochentwickelte Fähigkeit zu deren Anreicherung ausgleichen konnten. Dieses Akkumulationsvermögen bedingt aber nachteiligerweise auch die Mitaufnahme von Stoffen, die – zumindest ab einer bestimmten Konzentration – für den aufnehmenden Organismus toxikologisch problematisch werden. Somit konnten in der Evolution nur Arten bestehen, die neben der Fähigkeit zur Anreicherung notwendiger Stoffe auch gleichzeitig über Mechanismen zur Elimination oder Metabolisierung von schädlichen Begleitstoffen verfügten. Diese Problematik kommt in ganz ausgeprägter Weise beim Zusammenspiel von Quecksilber und Fisch zum Ausdruck.

Eine ausführliche Monografie über die Verbreitung von Quecksilber und seinen Verbindungen in der Umwelt findet sich bei KAISER und TÖLG [1].

Hiernach ist Quecksilber – auch ohne menschliches Zutun – in allen Bereichen der Biosphäre enthalten. Als natürliche Hintergrundkonzentration von Meerwasser werden Gehalte ab 0,0001 µg/Liter aufwärts angegeben. Hochgerechnet auf den Wasserkörper der Weltmeere von 1,35 Mrd. km<sup>3</sup> ergibt sich daraus ein natürlicher Stock von mindestens 130 Mio. Tonnen Quecksilber. Der hinzukommende globale geogene Eintrag wird auf 100.000 Jahrestonnen geschätzt, der damit deutlich höher ausfällt, als der auf 20.000 – 40.000 Tonnen geschätzte anthropogen bedingte Anteil. Rein rechnerisch würde somit der Quecksilbergehalt der Weltmeere jährlich um etwa 0,1 % ansteigen; der Anteil der natürlichen Deposition bzw. Elimination aus dem globalen Zyklus wurde nicht berücksichtigt.

Diese wenigen Basiszahlen machen deutlich, dass das globale Quecksilbergeschehen bislang von natürlichen Gegebenheiten dominiert wird.

Dasjenige Quecksilber, welches die in die aquatische Nahrungskette eingebundenen Organismen bei der Deckung ihres Bedarfes an essentiellen Spurenstoffen mit aufnehmen, wird bereits auf niedrigen trophischen Stufen durch Biomethylierung „entschärft“. Die so verminderte Toxizität verkehrt sich allerdings in den höheren trophischen Stufen in ihr Gegenteil. In den meisten Konsumenten von Fischen, der Mensch eingeschlossen, entwickelt methyliertes Quecksilber eine weitaus höhere Toxizität als das rein anorganische Quecksilber.

Glücklicherweise sind aber diese überwiegend natürlich zustande gekommenen Quecksilbergehalte in Fischen der Weltmeere, die der menschlichen Ernährung dienen, von wenigen Ausnahmen abgesehen so niedrig, dass von ihnen kein gesundheitliches Risiko ausgeht. Allerdings bleibt festzustellen, dass besonders exponierte, trophisch hochstehende, langsam abwachsende, ein hohes Lebensalter erreichende Arten wie bestimmte Haie, Schwertfisch oder weißer Heilbutt auch bereits unter „natürlichen“ Bedingungen relativ hohe Quecksilbergehalte enthalten können.

Völlig andere und verschärfte Zusammenhänge werden bei Betrachtung eingegrenzter bzw. abgeschlossener Biotope sichtbar. Beim Eintrag von Quecksilberverbindungen in Binnengewässer oder austauscharme Küstengewässer kann es zu verhängnisvollen Entwicklungen kommen. Die Minamata-Katastrophe ist wohl das herausragendste jener Ereignisse, bei denen Mensch und Natur schwerste Schäden in Folge eines verantwortungslosen Umgangs mit Quecksilber zugefügt wurden. Eine ausführliche Abhandlung zu diesem komplexen Thema findet sich bei KUDO und TURNER [2].

Nach Erkennen der Zusammenhänge des Minamata-Syndroms sind in der Folge weltweit zahlreiche – wenn auch weniger spektakuläre – Fälle aufgedeckt worden, bei denen Quecksilber oder seine Verbindungen eine unheilvolle Rolle gespielt haben.

Die Forschungsvorhaben „Exposition mit Methylquecksilber durch Fischverzehr“ (Forschungskennzahl 705 61 416) mit einer Laufzeit vom 1.8.2005 bis 30.6.2007 und „Etablierung analytischer Methoden zur Bestimmung von Methylquecksilber in Fischereierzeugnissen“ (Forschungskennzahl UM 07 61 641) mit einer Laufzeit vom 1.7.2007 bis 31.12.2007 wurden aus dem Umweltforschungsplan des Bundesumweltministeriums gefördert. Beide Vorhaben wurden vom Institut für Fischkunde in Cuxhaven des Niedersächsischen Landesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit durchgeführt und fachlich vom Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin, betreut.

## **1.2 Die Spurenanalyse von Quecksilber in Fischen**

Die spezifischen physikalischen und chemischen Eigenschaften des Quecksilbers haben frühzeitig zu Entwicklungsmöglichkeiten einer empfindlichen und zuverlässigen Analytik im untersten Spurenbereich beigetragen. Seine hohe Flüchtigkeit im elementaren Zustand, der atomare Zustand seines Dampfes bereits bei Raumtemperatur und dessen empfindliche Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung im UV-Bereich bieten gute Voraussetzungen zu seiner Bestimmung u.a. in aufgeschlossenen organischen Matrices. Bereits 1969 haben HATCH und OTT ihre auf Kaltdampf-Atomabsorptions-Spektralfotometrie beruhende klassische Methode entwickelt, die seitdem in zahllosen Modifikationen ihre Anwendung gefunden hat [3].

Mit vertieftem Einblick in die sehr unterschiedlichen Toxizitäten in Abhängigkeit von der Bindungsart des Quecksilbers wurde der Bedarf nach weiterer Verfeinerung der Analytik in Richtung seiner Spezierung erkennbar. Richtungsweisend waren hier die Arbeiten von WESTÖÖ [4, 5, 6].

Die Entwicklung der Speziesanalytik des Quecksilbers ist – wie generell auch bei organischen Verbindungen anderer Elemente – bis zum heutigen Tag mit Schwierigkeiten verbunden. Von den mannigfaltigen Gründen sind hier insbesondere die von der Probenmatrix ausgehenden Interferenzen sowie die Reaktivitäten der zu bestimmenden Elementspezies wie auch die der u.U. benötigten Derivate zu nennen. Nach wie vor wird in zahlreichen Arbeitsgruppen an der Entwicklung und Verbesserung von speziesanalytischen Methoden gearbeitet. Allein in Deutschland beschäftigt sich mindestens ein Dutzend von Arbeitsgruppen in spezialisierten Laboratorien von Universitäten, Forschungseinrichtungen, Behörden und Industrie mit diesem anspruchsvollen Zweig der chemischen Analytik.

Das Institut für Fische und Fischereierzeugnisse (IFF) Cuxhaven und seine Vorläufer-Institutionen haben sich bereits frühzeitig sowohl mit der Analytik und Überwachung von Quecksilber in Fischen beschäftigt als auch an Entwicklungen von speziesanalytischen Methoden beteiligt. Dies war schon deswegen unvermeidlich, weil sich viele Probleme der chemischen Umwelt- und Gewässerbelastung in aquatischen Lebensmitteln intensiver auswirken als in denen aus anderen wie terrestrischen Bereichen. Die Verpflichtung des Cuxhavener Instituts zur umfassenden Überwachung des Lebensmittels „Fisch“, insbesondere seit Inkrafttreten einer Höchstmenge für Quecksilber in Fischen, Krusten-, Schalen- und Weichtieren in Höhe von 1 mg/kg im Jahr 1975, machte eine frühzeitige Beschäftigung insbesondere mit der Quecksilberproblematik unumgänglich [7, 8, 9]. Nachdem innerhalb dieses Themenkomplexes seit Beginn der 70er Jahre des vergangenen Jahrhunderts vornehmlich Gesamtquecksilber die Hauptrolle in wissenschaftlichen Untersuchungen und bei der amtlichen Lebensmittelüberwachung spielte, wird seit den 80er Jahren in nationalen Gremien maßgeblich an der Etablierung von Methoden für die Speziesanalytik von Arsen- und Zinn-organischen Verbindungen mitgearbeitet. Auf den dabei gewonnenen Erfahrungen aufbauend bot es sich an, das Cuxhavener Institut auch mit der Entwicklung einer praxistauglichen Methode für die Bestimmung von Quecksilber-Spezies in Fischen zu beauftragen. Daher wird im

vorliegenden Bericht der Beschreibung der Methodenentwicklung ein besonderer Stellenwert eingeräumt.

## 2. Hauptteil

### 2.1.1 Die Besonderheiten der Speziesanalytik

Die Spuren- und Ultraspurenanalytik von Elementspezies in biologischen Untersuchungsmaterialien setzt sich in aller Regel aus den 4 Teilschritten zusammen:

1. Probenvorbereitung,
2. Derivatisierung,
3. Abtrennung (i.d.R. durch chromatografische Methoden),
4. Messung (Detektionsverfahren).

In der nachfolgenden Tabelle 1 werden die wichtigsten Teilschrittvarianten zusammengefasst, die grundsätzlich für die im vorliegenden Projekt gestellte Aufgabe geeignet erscheinen.

Tabelle 1:

Prinzipiell zur Quecksilber-Spezies-Analytik geeignete Basisoperationen

Probenvorbereitung	Derivatisierung	Trennungschromatografie	Detektion
<b>Extraktion mit Säuren</b>	<b>Alkylierung</b>	<b>GC</b>	<b>MS</b>
<b>Digestion mit Alkalien</b>	- NaB(Et) <sub>4</sub>	- gep. Säulen	<b>ICP-MS</b>
- TMAH	- NaB(Prop) <sub>4</sub>	- Kapillarsäulen	<b>ICP-OES</b>
<b>Enzymatisch</b>	<b>Arylierung</b>	<b>HPLC</b>	<b>AAS</b>
- Proteasen	- NaB(Ph) <sub>4</sub>	<b>SFC</b>	<b>AFS</b>
- Lipasen	<b>Reduktion/Hydrierung</b>		
	- NaBH <sub>4</sub>		

### 2.1.2 Die eigene Methode

Aus den vorangehend genannten Auswahlmöglichkeiten haben wir jeweils diejenigen bevorzugt auf Eignung geprüft, die schon in anderen Arbeitsgruppen erfolgreich eingesetzt worden waren.

Als besonders zielführend im Hinblick auf die grundlegenden Verfahrensvarianten erwies sich die Methode von HARMS und BUNKE [10].

Verbesserungsmöglichkeiten ergaben sich bei den von den genannten Autoren gewählten Arbeitstechniken bei den Bedingungen zur Derivatisierung, zur Abtrennung der Analyte und zur gaschromatografischen Messtechnik.

Die nunmehr vom IFF Cuxhaven zusammengestellte Methode setzt sich aus den in der folgenden Übersicht schematisch dargestellten Teilschritten zusammen (vgl. auch Abbildungen 1, 2a u. 2b):

Bestimmung von Quecksilber-Spezies in marinen Biota  
Schematische Darstellung der Prüfmethode 2007 des IFF Cuxhaven

1. Entfettung der Probe mit Essigsäureethylester (optional, nur bei Proben mit hohem Fettgehalt).
2. Serienmäßiger Aufschluss mit wässriger Lösung von Tetramethylammoniumhydroxid in silanisierten Reaktionsgefäßen.
3. Neutralisation und Pufferung mit Essigsäure.
4. Simultane Ethylierung mit wässriger Lösung von Natriumtetraethylborat und Austreibung (Strippen) der ethylierten Derivate mit Stickstoffstrom unter Ultraschall.
5. Kondensierung/Fokussierung der ethylierten Derivate in Decanvorlage.
6. Trocknung mit Natriumcarbonat.
7. Splitlose Flüssiginjektion in GC (automatischer Probenaufgeber).
8. Gaschromatografische Trennung auf Dickfilm-Kapillare.
9. Post-Column Pyrolyse zu elementarem Quecksilber.
10. Detektion mittels Kaltdampf-Atomfluoreszenz (CV-AFS).

Die vollständige Arbeitsvorschrift kann unter der Korrespondenzanschrift angefordert werden.

Nachfolgend wird auf wesentliche von uns eingeführte Neuerungen und Besonderheiten unserer Methode eingegangen, sofern sie nicht bereits in der spurenanalytischen Praxis Allgemeingut sind:

#### **Entfettung:**

Dieser Schritt ist bei Proben mit hohem Fettgehalt (etwa ab 10 %) notwendig. Zu hohe Fettgehalte behindern den Aufschluss, beanspruchen unnötig Derivatisierungskapazität und verlangsamen die Austreibung der ethylierten Derivate.

#### **Serienmäßiger Aufschluss in silanisierten Reaktionsgefäßen:**

Der Aufschluss und die (spätere) Etylierung erfolgen in ein und demselben silanisierten 20 ml HS-Gefäß. Die Silanisierung (aus Hexamethyldisilazan aufgetragen) verleiht der Glasoberfläche ein erhöhtes Maß an Inertheit, wodurch Wandreaktionen während der Aufschlussphase und insbesondere während der Freisetzung der ethylierten Derivate zurückgedrängt werden.

#### **Simultane Ethylierung und Austreibung unter Ultraschall**

Die Zugabe des Ethylierungsreagenzes erfolgt mittels Multikanal-Peristaltikpumpe. Dies ermöglicht die parallele Bearbeitung einer größeren Anzahl von Proben. Zeitgleich zur Reagenzzugabe werden die Reaktionsgefäße auf 60°C gehalten und ultraschallt. Hierdurch

wird eine schnellstmögliche Abtrennung der flüchtigen ethylierten Derivate vom wässrigen Reaktionsansatz erzielt. Auf diese Weise werden Konkurrenzreaktionen wie Reduktion zu elementarem Quecksilber oder Fehlalkylierungen weitestgehend zurückgedrängt.

### **Kondensierung in Decanvorlage**

Anstelle der sonst häufig beschriebenen Fokussierung der ethylierten Derivate auf festen Trägern wie Tenax GC (ggf. auch direkt im Injektor des GC) werden bei uns die ausgetriebenen Analyte in eine Flüssigvorlage kondensiert. Dies ermöglicht im späteren Verlauf die automatische Flüssiginjektion beliebig großer Probenserien bei der gaschromatografischen Messung.

Decan ist an dieser Stelle besonders geeignet. Bei Decan treten einerseits bei einem Siedepunkte von 174°C keine nennenswerten Verflüchtigungen während seiner Rolle als Fokussierungs-Agens durch den Gasstrom ein. Andererseits ist seine Flüchtigkeit aber ausreichend hoch, um bei den späteren gaschromatografischen Vorgängen nicht unerwünscht zu rekondensieren.

### **Gaschromatografie auf Dickfilmkapillare**

Nach der Ethylierung sind die nunmehr entstandenen Verbindungen Methylthylquecksilber und Diethylquecksilber gaschromatografisch zu bestimmen. Bei der Auswahl der Trennsäulen sind folgende Gegebenheiten bzw. Anforderungen zu beachten:

- Die genannten Verbindungen zeichnen sich u.a. durch hohe Flüchtigkeit und Reaktivität aus.
- Die Anforderungen an die Trennleistung der GC-Säulen sind leicht zu erfüllen, da nur wenige Analyte zu trennen sind, die sich zudem ausreichend in ihren physikalischen Eigenschaften unterscheiden.
- Es wird eine möglichst hohe Empfindlichkeit angestrebt.

Diesen Anforderungen entsprechen nach unseren Erfahrungen am ehesten kurze Widebore-Dickfilmkapillaren (15-30 m / 0,53 mm / 2-5 µm). An den in Abbildung 2a wiedergegebenen Chromatogrammen wird deren völlig ausreichende Trennleistung erkennbar. Ferner tolerieren sie große splitlose Injektionsvolumina bis 10 µl.

### **Post-Column Pyrolyse**

Nach dem gaschromatografischen Trennprozess verlassen die Analyte, das Lösungsmittel und weitere flüchtige Verbindungen aus dem ursprünglich injizierten Volumen den Ausgang des GC. Vor der Detektion sind die Quecksilberverbindungen pyrolytisch in elementares Quecksilber umzuwandeln, da nur dieses der Atomfluoreszenz zugänglich ist.

Die noch bis vor kurzem von den Geräteherstellern angebotenen apparativen Lösungen machen zumeist noch eine Kopplung des Gaschromatografen mit einer gesonderten (zwischen geschalteten) Pyrolyseeinheit und einem externen Detektor vor Ort (beim Anwender) erforderlich. Bei unseren Arbeiten wurde ein kommerziell erhältlicher Mini-Röhrenofen mit eingesetztem Quarzrohr zwischen GC und Detektor von jeweils unterschiedlichen Geräteherstellern installiert (s. Abbildung 2b).

Erfreulicherweise haben in jüngster Zeit die Gerätehersteller reagiert und bieten nunmehr komplette Lösungen an, bei welchen GC, Pyrolyseeinheit und Detektor aus einer Hand zusammengefügt angeboten werden. So kann bei Bedarf auf die – oftmals abenteuerlich wirkenden – Eigenlösungen für die Gerätekopplung verzichtet werden.

Wegen der Aktualität der Entwicklung konnte im vorliegenden Projekt von diesen Möglichkeiten (noch) kein Gebrauch gemacht werden. Die kommerziell angebotenen Lösungen dürften sich aber fördernd auf die Akzeptanz der von uns entwickelten Methode auswirken.

In Abbildung 2b wird der Aufbau des gaschromatografischen Messplatzes dargestellt.

### **Detektion durch Kaltdampf-Atomfluoreszenz**

Atomfluoreszenzspektrometer werden von verschiedenen Herstellern in einbaufähiger bzw. an einen GC ankoppelbarer Dimensionierung angeboten. Diese Detektionstechnik ist für die Quecksilberanalytik aus mehreren Gründen sehr gut geeignet. U.a. bietet sie:

- sehr hohe Empfindlichkeit und Selektivität;
- geringe Störanfälligkeit der apparativen Ausstattung;
- günstiges Preis/Leistungs-Verhältnis;
- leichte Bedienbarkeit.

Der aus unserer Sicht einzige signifikante Nachteil ist darin zu sehen, dass eine Nutzung dieser Technik für andere analytische Anwendungen außerhalb der Quecksilberanalytik praktisch ausgeschlossen erscheint.



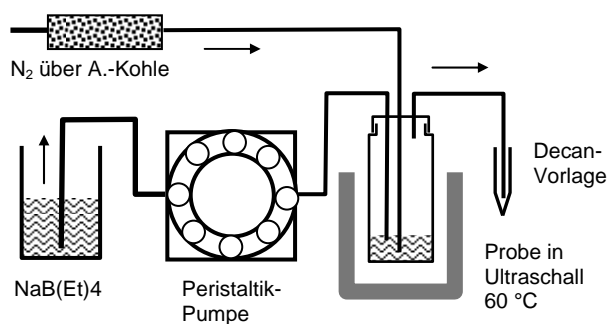
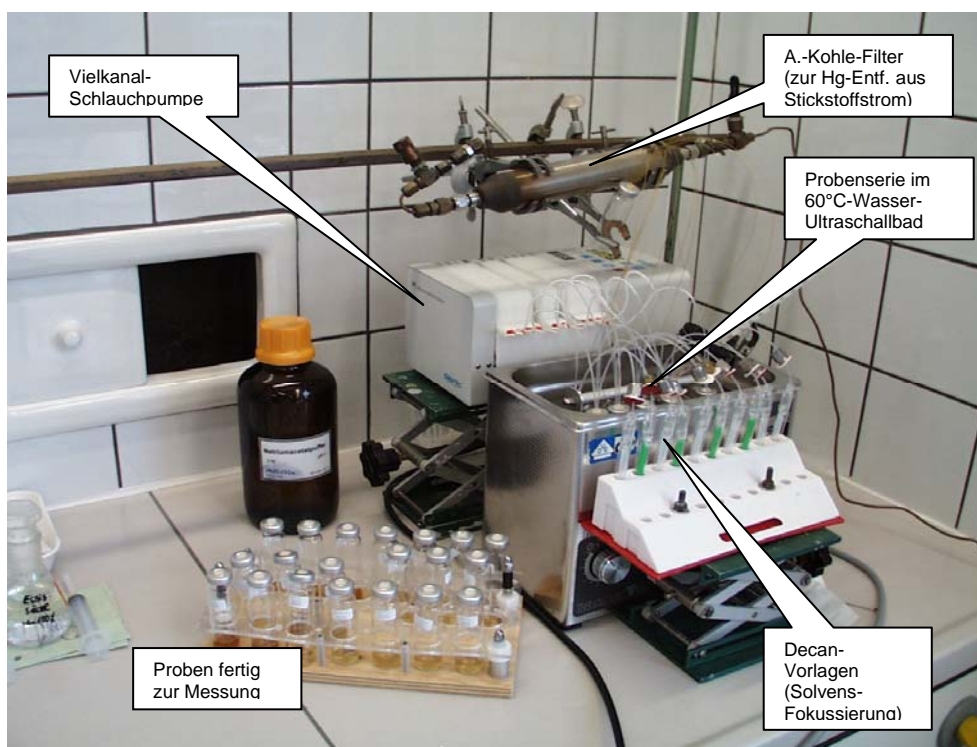


Abbildung 1:  
Apparatur zur simultanen  
Derivatisierung und Solvens-  
Fokussierung  
(Foto und schematische  
Darstellung als Fließschema)

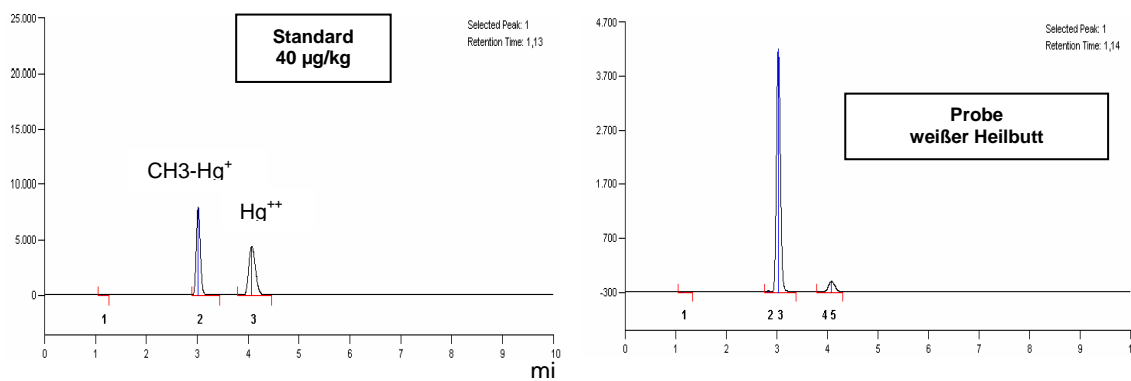


Abbildung 2a: Chromatogramme von Standard und realer Probe

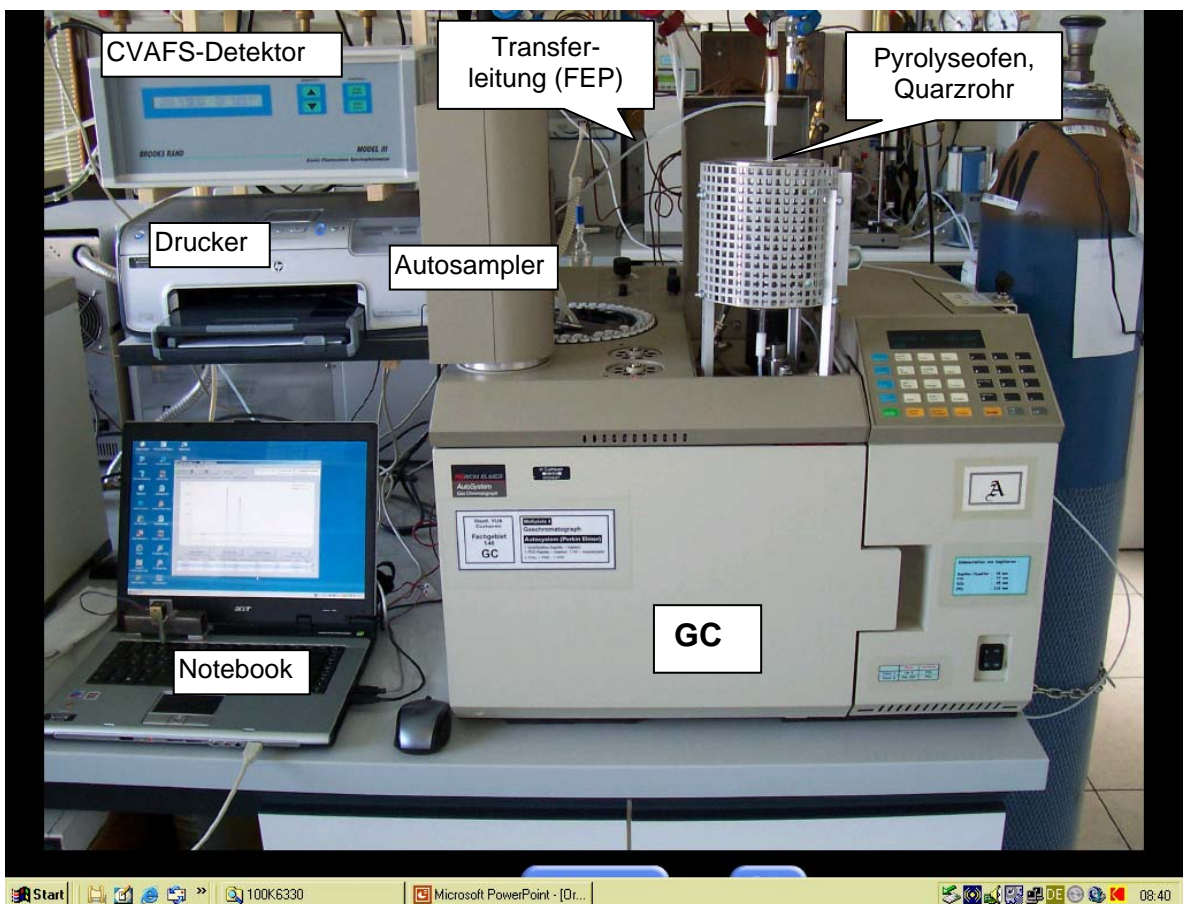
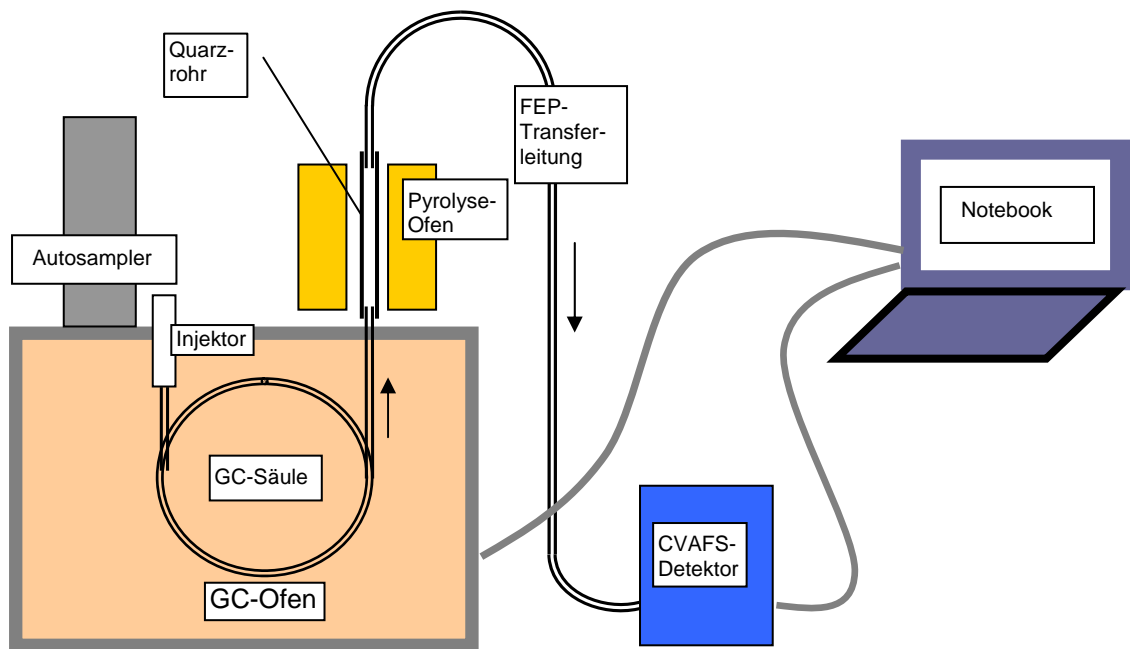


Abbildung 2b:  
Gaschromatografischer Messplatz (schematische Darstellung und Abbildung)

### 2.1.3 Beleganalysen

Die Qualitätskriterien der von uns erstellten Methode lassen sich anhand der nachfolgend vorgestellten Ergebnisse belegen.

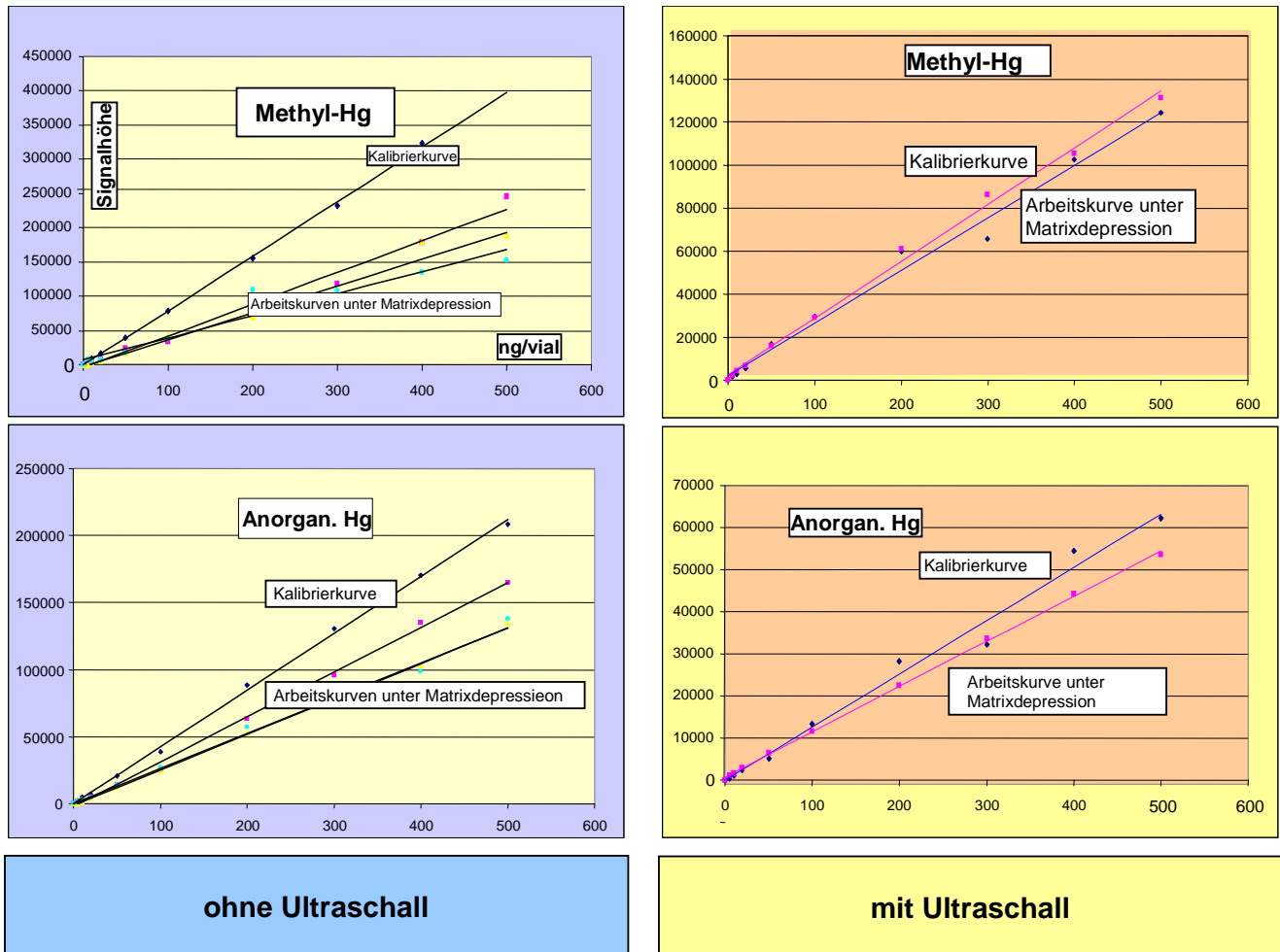


Abbildung 3: Optimierung der analytischen Wiederfindungsraten durch Anwendung von Ultraschall bei der simultanen Ethylierung / Austreibung

In Abbildung 3 werden die Ergebnisse von Standardadditionsexperimenten zusammengefasst. Im Einzelnen wurde hier Fischhomogenat mit den Konzentrationen der externen Kalibriergeraden mit Methylquecksilberchlorid und Quecksilberdichlorid dotiert (Aufstockmethode). Beim Vergleich der Steigungsdifferenzen wird die Bedeutung der Ultraschallung während des Derivatisierungs- und Austreibungsprozesses verdeutlicht. Ohne diese Maßnahme würden sich Minderbefunde ergeben.

In Abbildung 4 werden die an zwei kommerziellen Referenzmaterialien erzielten Untersuchungsergebnisse zusammengefasst. Die sehr gute Übereinstimmung mit den zugehörigen Zertifikatsangaben belegt die Zuverlässigkeit unserer Methode.

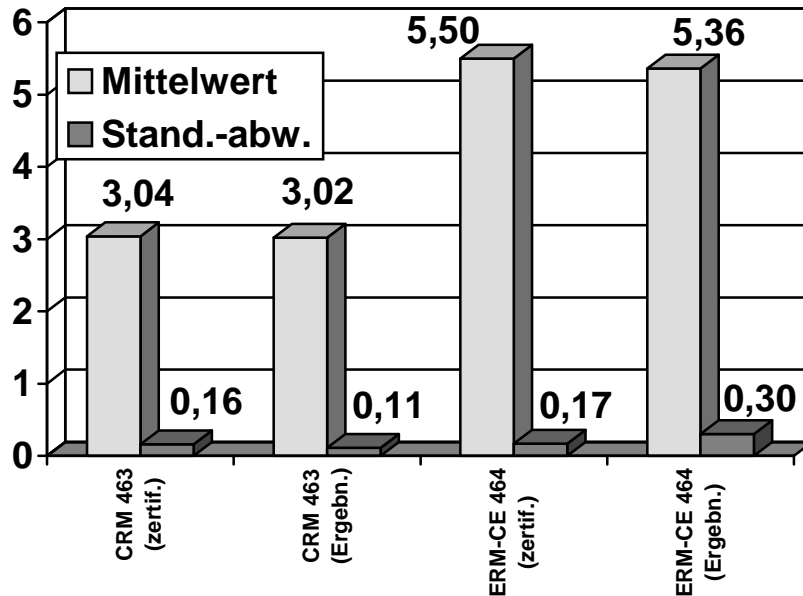


Abbildung 4:

Ergebnisse der Bestimmung von Methylquecksilber in 2 unterschiedlichen Referenzmaterialien (Angaben in mg/kg)

#### 2.1.4 Bewertung unserer Methode im Vergleich mit anderen Verfahren

Den spezifischen Problemen, die sich bei der Quecksilberspeziesanalytik einstellen, lässt sich auf verschiedene Weise begegnen. Zur Zeit werden die beiden folgenden strategischen Ansätze am intensivsten diskutiert:

##### Ansatz 1:

##### Konzept der bewussten Inkaufnahme von (unvermeidlichen) Fehlreaktionen bei der Probenaufarbeitung und deren nachträgliche Kompensation

Nach dem Aufschluss werden vor der weiteren Aufarbeitung interne Isotopenstandards zugesetzt („Isotopenverdünnungsmethode“). Diese verhalten sich identisch zu den nativen Analyten im Aufschluss. Mögliche Fehler lassen sich rechnerisch ausgleichen. Eine Realisierung dieses Ansatzes ist aber an die Verfügbarkeit von unterschiedlich isotopenmarkierten Referenzsubstanzen für jeden Analyten sowie (in technischer und kommerzieller Hinsicht relativ anspruchsvolle) massenselektive Detektionsverfahren gebunden.

Diesen Ansatz haben in jüngster Vergangenheit mehrere Arbeitsgruppen gewählt und als sehr sicheres Verfahren beschrieben. Richtungsweisende Beiträge liefern hierzu u.a. die Arbeiten von HEUMANN [11] und DEMUTH [12].

## **Ansatz 2:**

### Konzept der bestmögliche Vermeidung von Fehlreaktionen von Beginn an

Bei allen Teilschritten werden Fehlreaktionen konsequent vermieden bzw. minimiert. Nach der Probenvorbereitung lassen sich somit mit allen grundsätzlich geeigneten Messverfahren zuverlässige Ergebnisse erzielen. Auf diese Weise erschließt sich die vorliegende Methode einem wesentlich größeren Kreis von Anwendern mit unterschiedlichen apparativen Voraussetzungen.

Unsere eigene Methodenentwicklung beruht auf dem Konzept des 2. Ansatzes. Auch bei anderen Autoren wie z.B. KÜLLMER [13] wird nach diesem Konzept vorgegangen.

Beide strategischen Ansätze haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Welcher Methode der einzelne Analytiker den Vorzug einräumt, ist in erster Linie eine Frage der apparativen Gegebenheiten.

Grundsätzlich sehen wir aber in der konsequenten Vermeidung bzw. im Zurückdrängen von Fehlerquellen bereits im Vorfeld vor der am Ende stehenden Messung eine handwerkliche Tugend des Analytikers.

## **2.2 Ergebnisse**

### **2.2.1 Die Gehalte der Quecksilber-Spezies in Abhängigkeit von makroskopischen**

#### **Parametern**

Die Aufnahme von Quecksilber mit der Nahrung ist bei Fischen ein Vorgang, der sich über deren gesamtes Leben erstreckt. Während die Hauptbestandteile der als Nahrung aufgenommenen Biomasse nach der Verstoffwechslung größtenteils wieder ausgeschieden wird, werden zahlreiche Spurenstoffe – darunter auch Quecksilber und weitere Umweltkontaminanten – in Organen und Gewebe der Fische gespeichert. Durch diesen selektiven Anreicherungsprozess kommt es zu einem kontinuierlichen Anstieg während der gesamten Lebensphase (der sog. Altersakkumulation).

Besonders anfällig für die Aufnahme erhöhter Mengen an Quecksilber sind daher Arten, die

- in der Nahrungskette einen exponierten, auf hoher trophischer Stufe stehenden Platz einnehmen wie große Raubfische;
- ein hohes Lebensalter erreichen, wie z.B. weißer Heilbutt;
- vorbelastete Organismen als Nahrung aufnehmen, wie Fische aus zivilisatorisch belasteten Gewässern.

In den Abbildungen 5 bis 12 wird der Zusammenhang zwischen Alter der Individuen (Ersatzparameter Individualgewicht) und den Gehalten der Quecksilber-Spezies wiedergegeben. Für diese Darstellung wurden nur solche Probenkollektive ausgewählt, die ausreichend viele Individuen umfassten und von denen zudem noch Länge und Gewicht im unbearbeiteten Zustand ermittelbar waren.

Es stellt sich in allen Fällen eine qualitativ ähnliche Dynamik des Aufnahmegeschehens ein. Zwar steigen sowohl die Methylquecksilbergehalte als auch die von anorganischem Quecksilber mit steigendem Gewicht an; die Streubreite der Messwerte überlagert diesen Trend jedoch erheblich. Die hieraus zu ziehende Schlussfolgerung besagt, dass die selektive Aus-sortierung von extrem alten (großen bzw. schweren) Individuen nur eine begrenzte Möglichkeit zur Verringerung der fischbedingten Quecksilberaufnahme im Hinblick auf die spätere Exposition des Konsumenten darstellt.

Abbildung 5: Die Gehalte von Methylquecksilber in Aalen in Abhängigkeit vom Individualgewicht

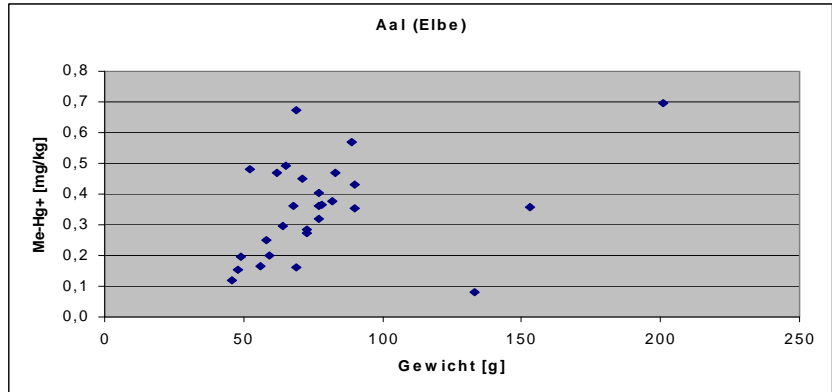


Abbildung 6: Die Gehalte von anorgan. Quecksilber in Aalen in Abhängigkeit vom Individualgewicht

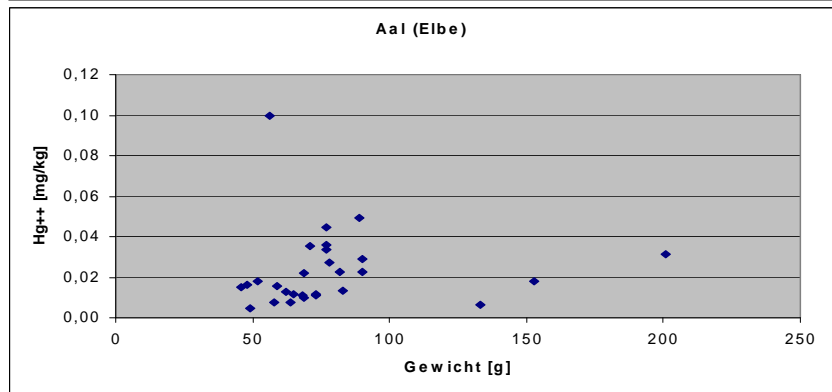


Abbildung 7: Die Gehalte von Methylquecksilber in Brassen in Abhängigkeit vom Individualgewicht

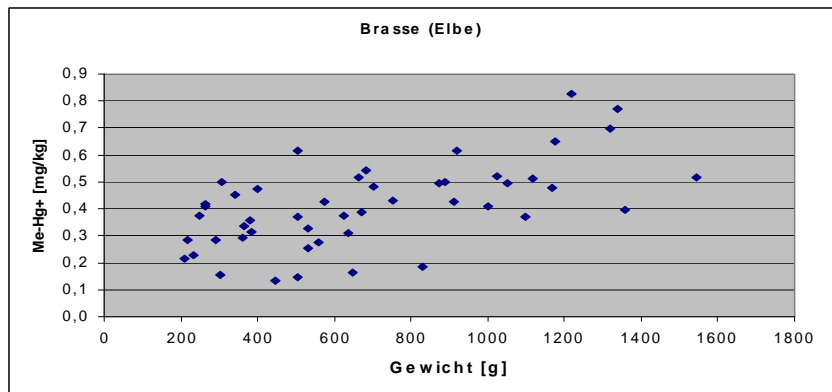


Abbildung 8: Die Gehalte von anorgan. Quecksilber in Brassen in Abhängigkeit vom Individualgewicht

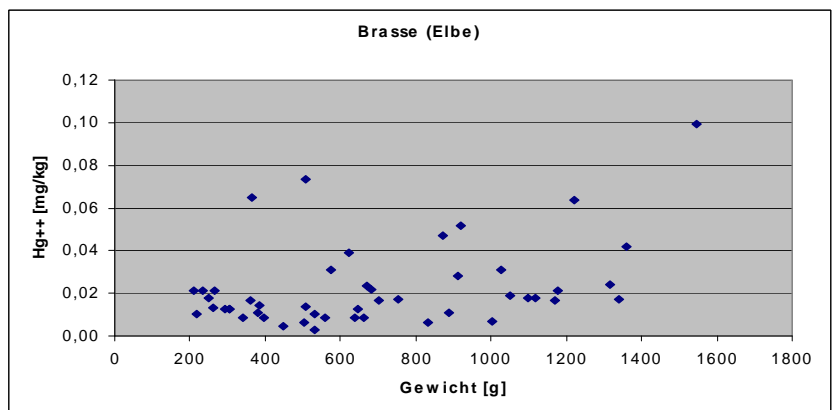


Abbildung 9: Die Gehalte von Methylquecksilber in Dorschen in Abhängigkeit vom Individualgewicht

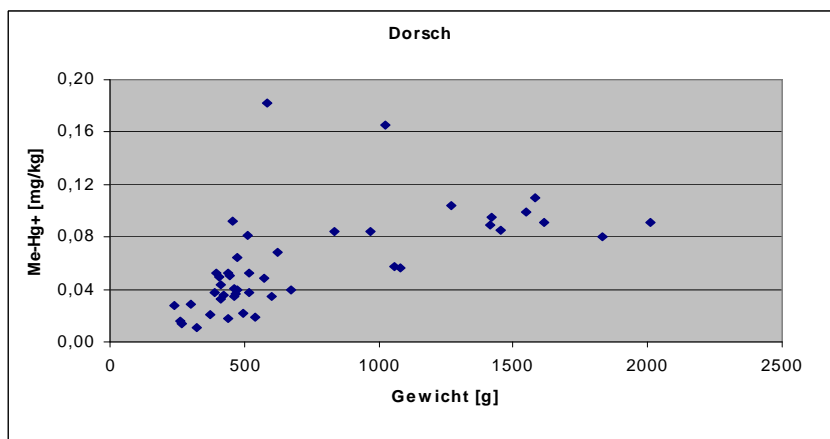


Abbildung 10: Die Gehalte von anorganischem Quecksilber in Dorschen in Abhängigkeit vom Individualgewicht

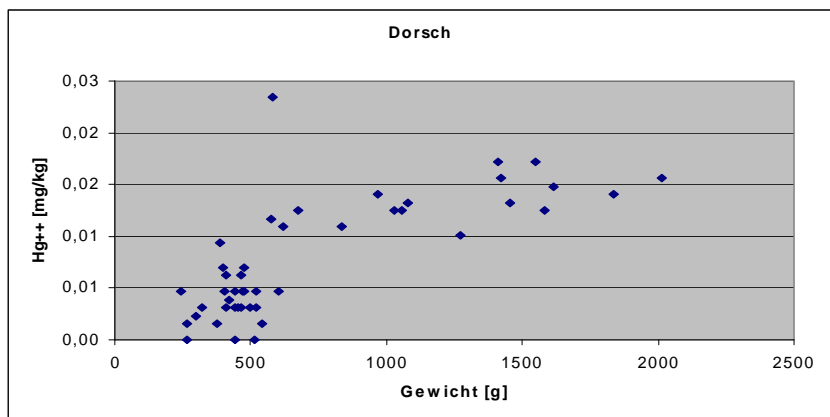


Abbildung 11: Die Gehalte von Methylquecksilber in Makrelen in Abhängigkeit vom Individualgewicht

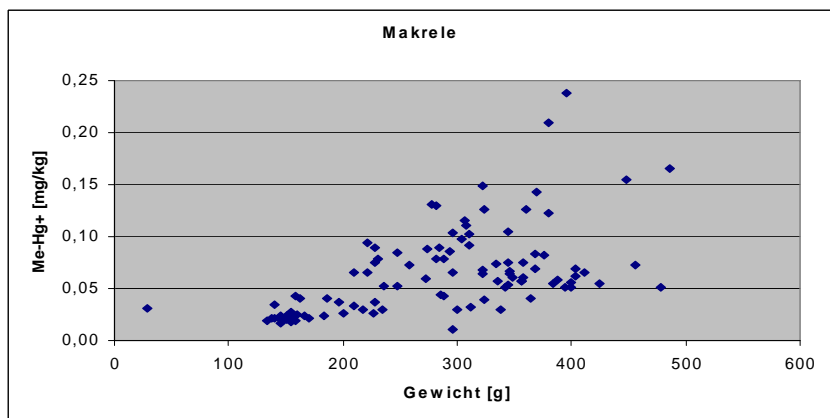
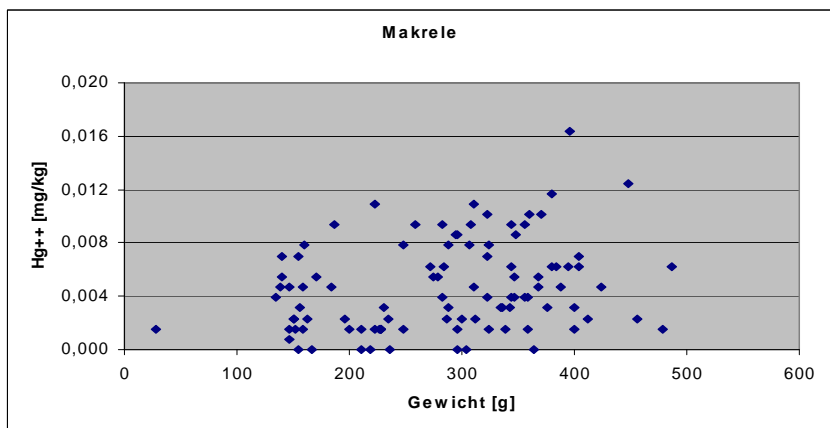


Abbildung 12: Die Gehalte von anorganischem Quecksilber in Makrelen in Abhängigkeit vom Individualgewicht



## 2.2.2 Die internen Speziesrelationen

Der relative Anteil des Methylquecksilbers am Gesamt-Quecksilber-Gehalt stellt keine konstante Größe dar. Er unterliegt ganz eindeutig mehreren äußeren Einflussgrößen. Deren quantitative Erfassung und Deutung war ein wichtiger Teilaspekt bei unseren Untersuchungen.

In den Abbildungen 13 bis 25 wird die Dynamik der Speziesverhältnisse in Abhängigkeit von der Belastungshöhe - ausgedrückt als Gesamt-Quecksilber - für ausgewählte Probenkollektive dargestellt. Die Darstellungen sind auf Probenarten beschränkt, die in ausreichender Individuenzahl ( $n > 20$ ) bearbeitet werden konnten.

Insgesamt lassen die Abbildungen 13 bis 25 erkennen, dass der Methylquecksilber-Anteil mit steigendem Gesamt-Quecksilber-Gehalt tendenziell zunimmt. Aber auch dieser Effekt wird, wie der der „Altersakkumulation“, von der erheblichen Streubreite der Messwerte überlagert.

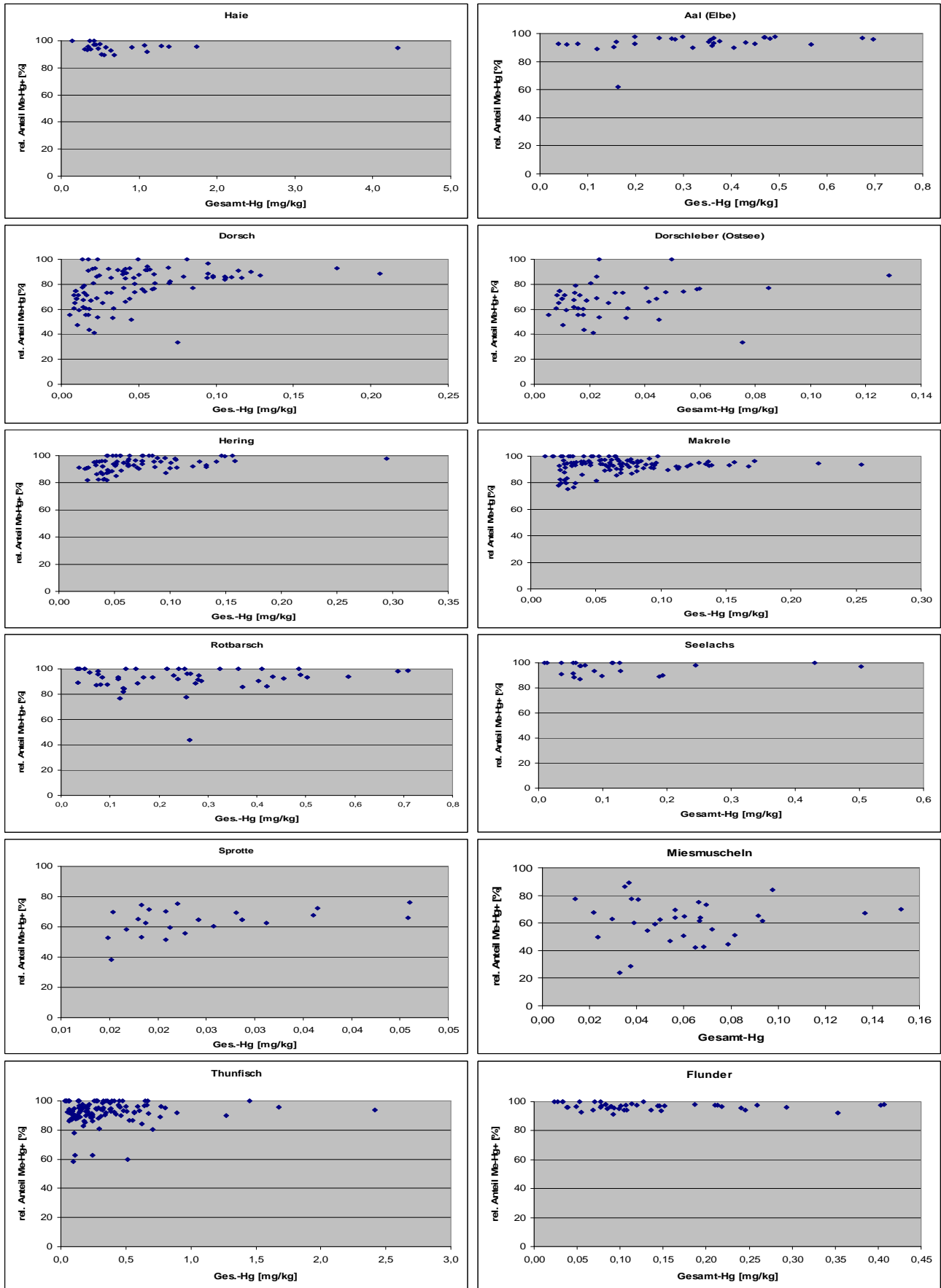
In den Abbildungen 26 bis 38 wird dargestellt, wie sich die beiden geprüften Quecksilber-Spezies unmittelbar zueinander verhalten. Fischart- bzw. probenspezifische Unterschiede treten klar erkennbar hervor. Mehrheitlich ist zwar auch hier ersichtlich, dass Methylquecksilber die dominierende Spezies darstellt. In einigen Arten (Miesmuscheln, Sprotten, Dorschleber) sinken die Methylquecksilber-Anteile aber z.T. auf unter 50 % ab. Bei orientierenden Untersuchungen der Fischart „Blue Marlin“ wurden außergewöhnlich niedrige Methylquecksilber-Anteile bei gleichzeitig extrem hoher Gesamt-Quecksilber-Belastung angetroffen. Diese Befunde sollen in weiteren Untersuchungen ggf. erhärtet und vertieft werden.

Die Abbildungen 39 und 40 beinhalten die durchschnittlichen Speziesrelationen, wiedergegeben als Mittelwerte, für alle in ausreichender Individuenzahl ( $n > 5$ ) bearbeiteten Probenarten. Entsprechend der in Abschnitt 3.3 der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 festgesetzten Regelung erfolgt die Zusammenstellung getrennt gemäß Einteilung in Arten mit 1,0 bzw. 0,5 mg Gesamt-Quecksilber/kg als Höchstmenge [14].

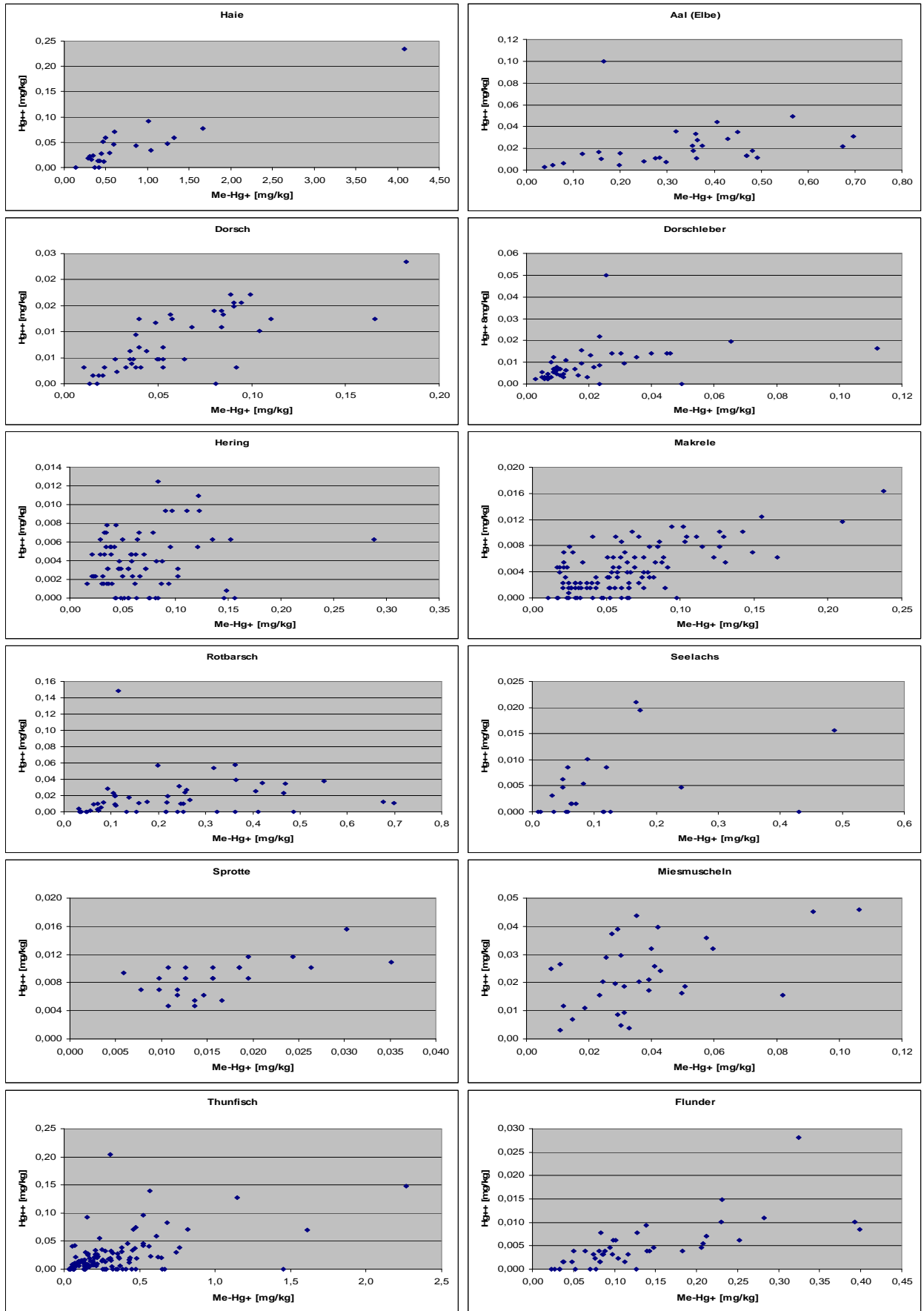
Die wesentlichen Aussagen, die sich aus den vorliegenden Daten ableiten, besagen Folgendes:

- Die relativen Speziesverhältnisse sind nicht für alle Probenarten gleich.
- Die Methylquecksilber-Anteile weisen je nach Fischart erhebliche Streubreiten auf und nehmen in Abhängigkeit von der Gesamt-Belastungshöhe mit Quecksilber tendenziell zu.
- Somit lässt sich u.E. kein zahlenmäßig klar definierter Bewertungsansatz über eine rechnerische Beziehung zwischen Gesamt-Quecksilber und den Speziesanteilen ableiten.
- Eine Bestimmung des Quecksilber-Gehaltes von Fischen allein über den Gesamtelementgehalt ermöglicht also nicht die differenzierte Beurteilung wie sie mittels Speziesanalyse erreichbar ist.
- Bei potenziell grenzwertig belasteten und dabei z.T. hochpreisigen Arten wie bestimmten Thunfischarten, Haien, Heilbutt, Schwertfisch, Buttermakrele u.a. werden von Fall zu Fall Beanstandungen wegen Überschreitung des zulässigen EU-Höchstgehalts für Gesamt-Quecksilber (hier: 1,0 mg/kg) ausgesprochen, die bei Beurteilung nach Speziesanalytik auf der Grundlage eines möglichen EG-Höchstgehalts für Methylquecksilber ggf. nicht zustande kämen.

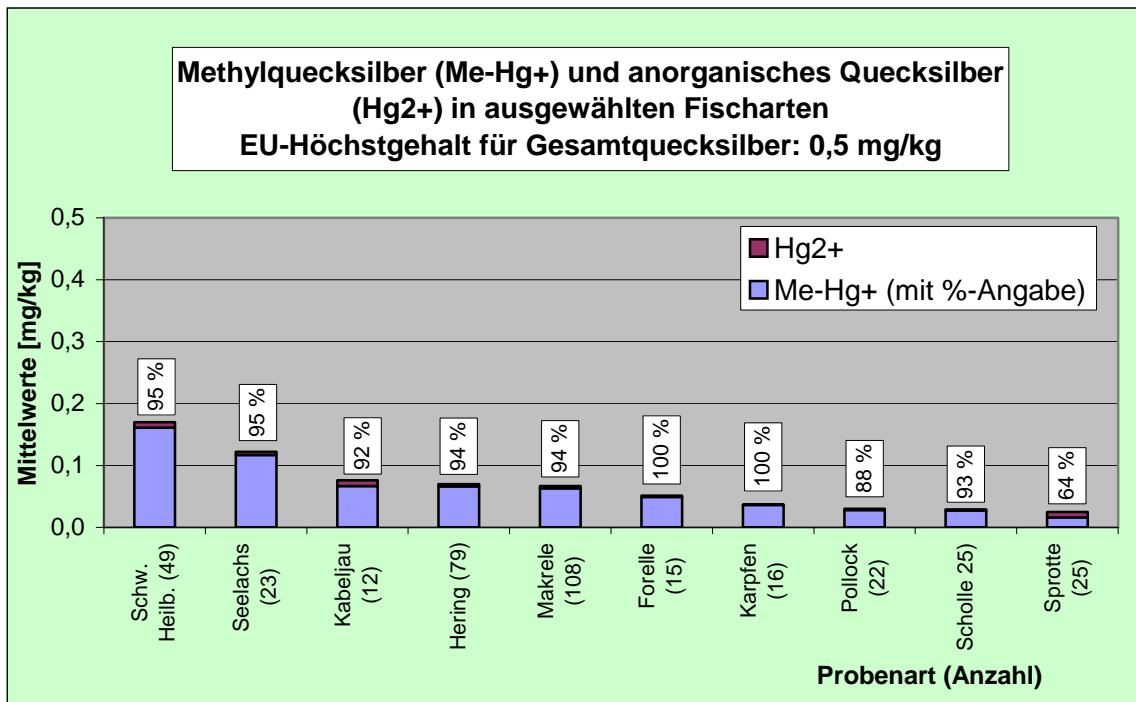
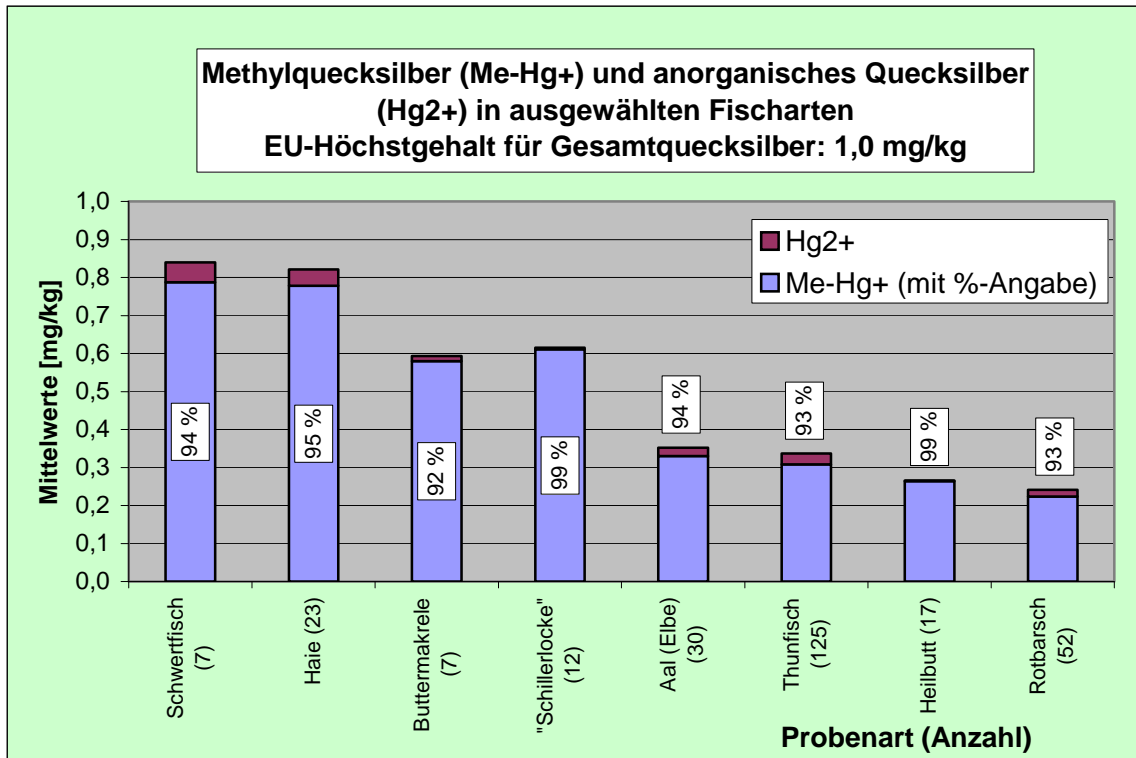




Abbildungen 13 – 25: Der relative Anteil von Methylquecksilber an Gesamt-Quecksilber bei 12 ausgewählten Probenarten



Abbildungen 26 – 38: Die Verknüpfung der Quecksilber-Spezies Methylquecksilber und anorganisches Quecksilber bei 12 ausgewählten Probenarten



Abbildungen 39 und 40:  
 Die relativen Anteile (Speziesverhältnisse) von Methylquecksilber (Me-Hg<sup>+</sup>) und anorganischem Quecksilber (Hg<sup>2+</sup>) in Probenarten mit zulässiger Höchstmenge von 1,0 mg/kg (oben) und 0,5 mg/kg (unten)

## 2.3 Zusammenstellung der Ergebnisse

Eine vollständige tabellarische Auflistung aller zur Bewertung heranzuziehenden Untersuchungsergebnisse einschließlich statistischer Basisparameter erfolgt in der nachfolgenden Tabelle 2.

Tabelle 2:  
Statistische Basisparameter aller Untersuchungsergebnisse (Gehalte in mg/kg)

Probenart	n	Mittelwert	Median	Min.	Max.	Stabw.	Hg-Spezies	Mittelwert % Methyl-Hg
Schwertfisch	7	0,787	0,649	0,211	2,104	0,689	Methyl-Hg <sup>+</sup>	94
	7	0,053	0,028	0,000	0,163	0,063	Hg <sup>2+</sup>	
Haie	23	0,778	0,481	0,143	4,082	0,816	Methyl-Hg <sup>+</sup>	95
	23	0,043	0,029	0,000	0,235	0,049	Hg <sup>2+</sup>	
Buttermakrele	7	0,580	0,564	0,403	0,774	0,150	Methyl-Hg <sup>+</sup>	92
	7	0,015	0,012	0,000	0,028	0,009	Hg <sup>2+</sup>	
"Schillerlocke"	12	0,611	0,502	0,250	1,359	0,370	Methyl-Hg <sup>+</sup>	99
	12	0,004	0,000	0,000	0,020	0,007	Hg <sup>2+</sup>	
Aal (Elbe)	30	0,330	0,354	0,039	0,697	0,170	Methyl-Hg <sup>+</sup>	94
	30	0,022	0,016	0,003	0,100	0,019	Hg <sup>2+</sup>	
Thunfisch	125	0,308	0,218	0,031	2,265	0,310	Methyl-Hg <sup>+</sup>	93
	125	0,023	0,014	0,000	0,204	0,032	Hg <sup>2+</sup>	
Heilbutt	17	0,264	0,183	0,050	0,837	0,236	Methyl-Hg <sup>+</sup>	99
	17	0,002	0,000	0,000	0,024	0,006	Hg <sup>2+</sup>	
Rotbarsch	52	0,224	0,207	0,031	0,698	0,166	Methyl-Hg <sup>+</sup>	93
	52	0,017	0,011	0,000	0,148	0,024	Hg <sup>2+</sup>	
Brasse (Elbe)	48	0,411	0,409	0,004	0,825	0,157	Methyl-Hg <sup>+</sup>	95
	48	0,023	0,017	0,003	0,099	0,020	Hg <sup>2+</sup>	
Schwarz. Heilb.	49	0,161	0,124	0,023	0,536	0,124	Methyl-Hg <sup>+</sup>	95
	49	0,009	0,005	0,000	0,067	0,013	Hg <sup>2+</sup>	
Flunder	45	0,128	0,098	0,023	0,399	0,092	Methyl-Hg <sup>+</sup>	96
	45	0,005	0,004	0,000	0,028	0,005	Hg <sup>2+</sup>	

Probenart	n	Mittelwert	Median	Min.	Max.	Stabw.	Hg-Spezies	Mittelwert % Methyl-Hg
Seelachs	23	0,117	0,070	0,010	0,488	0,121	Methyl-Hg <sup>+</sup>	95
	23	0,005	0,002	0,000	0,021	0,006	Hg <sup>2+</sup>	
Kabeljau	12	0,067	0,064	0,027	0,130	0,029	Methyl-Hg <sup>+</sup>	92
	12	0,009	0,004	0,000	0,055	0,015	Hg <sup>2+</sup>	
Hering	79	0,066	0,056	0,017	0,289	0,042	Methyl-Hg <sup>+</sup>	94
	79	0,004	0,003	0,000	0,012	0,003	Hg <sup>2+</sup>	
Makrele	108	0,063	0,057	0,011	0,238	0,041	Methyl-Hg <sup>+</sup>	94
	108	0,004	0,004	0,000	0,016	0,003	Hg <sup>2+</sup>	
Dorsch	45	0,059	0,051	0,011	0,182	0,037	Methyl-Hg <sup>+</sup>	88
	45	0,008	0,006	0,000	0,023	0,006	Hg <sup>2+</sup>	
Dorschleber	47	0,020	0,013	0,003	0,112	0,019	Methyl-Hg <sup>+</sup>	69
	47	0,009	0,006	0,000	0,050	0,008	Hg <sup>2+</sup>	
Forelle	15	0,049	0,048	0,029	0,072	0,011	Methyl-Hg <sup>+</sup>	100
	15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Hg <sup>2+</sup>	
Miesmuscheln	33	0,037	0,031	0,008	0,106	0,022	Methyl-Hg <sup>+</sup>	62
	33	0,023	0,020	0,003	0,046	0,012	Hg <sup>2+</sup>	
Karpfen	16	0,036	0,030	0,008	0,106	0,026	Methyl-Hg <sup>+</sup>	100
	16	0,000	0,000	0,000	0,005	0,001	Hg <sup>2+</sup>	
Garnelen	12	0,031	0,025	0,007	0,071	0,019	Methyl-Hg <sup>+</sup>	100
	12	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	Hg <sup>2+</sup>	
Pollock	22	0,014	0,011	0,000	0,206	0,022	Methyl-Hg <sup>+</sup>	88
	22	0,002	0,000	0,000	0,012	0,004	Hg <sup>2+</sup>	
Scholle	25	0,027	0,025	0,016	0,045	0,006	Methyl-Hg <sup>+</sup>	93
	25	0,002	0,002	0,000	0,004	0,001	Hg <sup>2+</sup>	
Sprotte	25	0,016	0,015	0,006	0,035	0,007	Methyl-Hg <sup>+</sup>	64
	25	0,009	0,009	0,005	0,016	0,003	Hg <sup>2+</sup>	

### 2.3.1 Bewertung der Ergebnisse nach lebensmittelrechtlichen Vorgaben

Eine rechtlich bindende Regelung für Methylquecksilber in Fischen existiert nicht. Daher kann nur hilfsweise auf die Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln, die feste Höchstmengenregelungen für Gesamt-Quecksilber vorgibt, zurückgegriffen werden [14].

Tabelle 3:  
Höchstmengenüberschreitungen und Grenzwertausschöpfungen

	Anzahl Proben	Höchstmenge (HM) [mg/kg]	durchschnittliche Gesamt-Hg-Gehalte [mg/kg]	Anzahl über HM [n]	Anteil über HM [%]	durchschnittl. Höchstmengen-ausschöpfung. [%]
Schwertfisch	7	1,0	0,895	2	28,6	89,5
Haie	23	1,0	0,821	6	26,1	82,1
Buttermakrele	7	1,0	0,593	0	0,0	59,3
"Schillerlocke"	12	1,0	0,515	2	16,7	51,5
Aal (Elbe)	30	1,0	0,373	0	0,0	37,3
Thunfisch	124	1,0	0,337	4	3,2	33,7
Heilbutt	17	1,0	0,288	0	0,0	28,8
Rotbarsch	52	1,0	0,241	0	0,0	24,1
Brasse (Elbe)	48	0,5	0,434	15	31,3	86,8
Schwarzer Heilbutt	49	0,5	0,223	0	0,0	44,6
Flunder	45	0,5	0,133	0	0,0	26,6
Seelachs	23	0,5	0,122	0	0,0	24,4
Kabeljau (Atltk.)	12	0,5	0,076	0	0,0	15,2
Hering	79	0,5	0,070	0	0,0	14,0
Makrele	108	0,5	0,067	0	0,0	13,4
Dorsch (Ostsee)	45	0,5	0,067	0	0,0	13,4
Dorschleber (Ostsee)	47	0,5	0,028	0	0,0	5,6
Forelle	15	0,5	0,051	0	0,0	10,2
Miesmuscheln	33	0,5	0,058	0	0,0	11,6
Karpfen	16	0,5	0,037	0	0,0	7,4
Prawns	12	0,5	0,036	0	0,0	7,2
Pollock	22	0,5	0,030	0	0,0	6,0
Scholle	25	0,5	0,029	0	0,0	5,8
Sprotte	25	0,5	0,025	0	0,0	5,0

In Tabelle 3 werden die sich hiernach ergebenden Überschreitungshäufigkeiten der Höchstmenge und Grenzwertausschöpfungen zusammengestellt. Hiernach ist festzustellen, dass im statistischen Mittel keine der aufgeführten Fischarten die 100 %-Marke übersteigt. Gleichwohl können jedoch Einzelexemplare exponierter Arten, wie Haie, Schwertfisch, „Schillerlocke“, Thunfisch, die Höchstmenge von 1 mg/kg überschreiten. Unter den Fischen aus Binnengewässern sind Überschreitungen der 0,5 mg/kg-Marke nur bei Brassen aus der Elbe zu verzeichnen.

Als gesundheitlich weitgehend unproblematisch erweist sich die Mehrheit der übrigen Probenarten. Die marktgängigen Seefischarten wie auch Forellen und Karpfen aus kommerziell genutzten Binnengewässern (Teichwirtschaften) enthalten die geprüften Quecksilberspezies nur in niedrigen Konzentrationen weit unterhalb der zulässigen Höchstmengen.

### 2.3.2 Bewertung der Ergebnisse nach toxikologischen Maßstäben

Eine Bewertung unserer Ergebnisse nach international anerkannten toxikologischen Referenzwerten lässt sich aus den in nachfolgender Tabelle 4 zusammengestellten Daten ableiten.

Tabelle 4: Bewertung der Ergebnisse nach toxikologischen Aspekten

Fischart	Me-Hg-Gehalte [µg/g]	mit 300 g Fisch aufgenommene Menge [mg]	Aufgenommene Menge pro kg KG [µg] (70 kg Person)	Ausschöpfung der JECFA Empfehlung von 1,6 µg/kg KG/Woche [%]	Ausschöpfung der NRC- Empfehlung von 0,7 µg/kg KG/Woche [%]	Marktanteil am Warenkorb [%] (Daten nach FIZ [15])	Rel. Beitrag zur Exposition durch Fisch- verzehr [%]
Schwertfisch	0,787	0,236	3,37	211	482	< 1	k.A.
Haie	0,778	0,233	3,33	208	476	< 1	k.A.
Buttermakrele	0,580	0,174	2,49	155	355	< 1	k.A.
"Schillerlocke"	0,611	0,183	2,62	164	374	< 1	k.A.
Aal (Elbe)	0,330	0,099	1,41	88	202	< 1	k.A.
Thunfisch	0,308	0,092	1,32	83	189	12,6	<b>41</b>
Heilbutt	0,264	0,079	1,13	71	162	< 1	k.A.
Rotbarsch	0,224	0,067	0,96	60	137	5,8	<b>13</b>
Brasse (Elbe)	0,411	0,123	1,76	110	252	< 1	k.A.
Schwarzer Heilbutt	0,161	0,048	0,69	43	99	< 1	k.A.
Flunder	0,128	0,038	0,55	34	78	< 1	k.A.
Seelachs	0,117	0,035	0,50	31	72	3,4	<b>4,2</b>
Kabeljau	0,067	0,020	0,29	18	41	2,5	<b>1,8</b>
Hering	0,066	0,020	0,28	18	40	15,0	<b>10</b>
Makrele	0,063	0,019	0,27	17	39	1,8	<b>1,2</b>
Dorsch	0,059	0,018	0,25	16	36	< 1	k.A.
Dorschleber	0,020	0,006	0,09	5	12	< 1	k.A.
Forelle	0,049	0,015	0,21	13	30	4	<b>2,1</b>
Miesmuscheln	0,037	0,011	0,16	10	23	< 1	k.A.
Karpfen	0,036	0,011	0,15	10	22	1,4	<b>0,5</b>
Garnelen	0,031	0,010	0,13	8	19	< 1	k.A.
Lachs	0,028	0,008	0,12	8	17	10,3	<b>3,0</b>
Pollock	0,028	0,008	0,12	8	17	24,7	<b>7,3</b>
Scholle	0,027	0,008	0,12	7	17	0,8	<b>0,2</b>
Sprotte	0,016	0,005	0,07	4	10	< 1	k.A.
<b>Warenkorbanteil „Fisch“</b>	<b>0,081</b>	<b>0,020</b>	<b>0,035</b>	<b>21</b>	<b>49</b>	<b>82,3</b>	<b>85</b>



Als toxikologisches Beurteilungskriterium kann auf die Empfehlung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) zurückgegriffen werden, nach welcher entsprechend der Stellungnahme des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) vom 29. März 2004 1,6 µg Methylquecksilber pro kg Körpergewicht (mg/kg KG) als „vorübergehende tolerierbare wöchentliche Aufnahme“ (provisional tolerable weekly intake = PTWI-Wert) empfohlen wurde. Diese Empfehlung basiert auf einer Einschätzung des Joint FAO/WHO Expert Committee on Food (JECFA) aus 2003. Ferner könnte auch auf die Empfehlung des „National Research Council“ (NRC) der USA verwiesen werden, der als „Intake Limit“ 0,7 µg/kg KG festsetzt.

Aus den in Tabelle 4 zusammengestellten Daten lässt sich entnehmen, inwieweit beim Verzehr der von uns untersuchten Fischarten dieser Empfehlung Rechnung getragen werden kann. Die im vorliegenden Projekt geprüften Fischarten repräsentieren über 80 % des vom Fisch-Informations-Zentrum (FIZ) für 2004 [15] angegebenen Vermarktungsumfangs und kommen vermutlich dem realen Verzehrsdurchschnitt sehr nahe. Die Ergebnisse machen deutlich, dass eine den PTWI-Wert überschreitende Aufnahme bei üblichen Verzehrsgewohnheiten und den im Durchschnitt ermittelten Methylquecksilber-Gehalten nicht zu erwarten ist. Unter Zugrundelegung der im Warenkorbanteil „Fisch“ erfassbaren Verbrauchsdaten wird die JECFA-Empfehlung zu 21 % ausgeschöpft, die des NRC zu 49 %. Als „Hauptlieferant“ tritt innerhalb der vom Fisch ausgehenden Exposition des Konsumenten Thunfisch hervor, auf diese Fischart entfallen allein 41 %. Zwar beträgt der durchschnittliche Methylquecksilber-Gehalt dieser Fischart nur mäßige 0,308 mg/kg; aufgrund des bedeutsamen Anteils von 12,6 % am Warenkorb „Fisch“ ergibt sich daraus aber eine dominierende Rolle innerhalb dieser Bilanzierung.

Die in Tabelle 4 zusammengefassten Ergebnisse lassen allerdings auch keinen Zweifel daran aufkommen, dass bei selektiver Bevorzugung insbesondere von Haien, Schwertfisch und Buttermakrelen eine beträchtliche Überschreitung der genannten Empfehlung in Kauf genommen würde. Da diese Arten aber innerhalb des Warenkorbes mit jeweils unter 1 % marginal bleiben, tragen sie insgesamt betrachtet nur unwesentlich zur Fisch bedingten Methylquecksilber-Exposition bei. Gleichwohl bleibt unstrittig, dass insbesondere Schwangere und Stillende auf den Verzehr solcher exponierten Arten verzichten sollten.

## 2.4 Fazit

Unter den gegenwärtigen Gegebenheiten der Kontaminationslage von Fischen mit Methylquecksilber, den üblichen Verzehrsgewohnheiten sowie im Hinblick auf lebensmittelrechtliche und toxikologische Beurteilungskriterien lassen unsere Ergebnisse kein generelles Expositionsrisiko beim Fischverzehr erwarten.

Bei einem erheblich über dem Durchschnitt liegenden Fischverzehr unter gleichzeitiger selektiver Beschränkung auf hoch belastete Individuen innerhalb weniger kontaminationsträchtiger Arten könnte jedoch zurecht eine individuelle kritische Exposition unterstellt werden.

Die EU-weit greifenden Kontroll- und Informationssysteme zur Unterbindung des Konsums Quecksilber-belasteter Fische verfolgen das Ziel eines anspruchsvollen Verbraucherschutzes. Dass dieser durch Einbeziehung der Speziesanalytik mit Augenmaß auf ein noch höheres Niveau gestellt werden kann, liegt nicht zuletzt angesichts der von uns erarbeiteten und hier vorgestellten Ergebnisse auf der Hand.

Durch Einbeziehung der Speziesanalytik zusätzlich zu oder anstelle von der reinen Elementaranalytik kann das vorrangige Ziel des Schutzes des Konsumenten vor kritisch belasteten Individuen sichergestellt werden, ohne dass es unnötigerweise zur Wegnahme eines wertvollen Lebensmittels vom Markt kommt.

## 3. Zusammenfassung und Ausblick

Gemäß § 13 Absatz 5 Lebens- und Futtermittelgesetzbuch ist das Bundesumweltministerium federführend zuständig für die Verhütung von Gefährdungen der Verbraucherinnen und Verbraucher, die von Lebensmitteln ausgehen, welche einer Einwirkung durch Verunreinigungen der Luft, des Wassers oder des Bodens (sog. Umweltkontaminanten)

ausgesetzt waren. Im Bereich der Lebensmittel gehören Fische bzw. Fischereierzeugnisse zu denen mit einem erhöhten Kontaminationsrisiko durch Quecksilber. Seit den unter dem Begriff „Minamata-Katastrophe“ eingetretenen Ereignissen in Japan sind weltweit tausende von Studien und Untersuchungen zu dieser Problematik erarbeitet worden. Bei deren großer Mehrzahl beschränken sich die Ergebnisse auf das unspizierte Gesamt-Quecksilber.

### **Spezierung von Quecksilber unerlässlich für Expositionsabschätzung**

Die genaue Ermittlung der Quecksilbergehalte von Fischen ist ein wichtiges Instrument sowohl bei der Überwachung der Umwelt als auch innerhalb der Lebensmittelüberwachung. Zwar setzt das Gemeinschaftsrecht in Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln Höchstgehalte für potenziell toxische Schwermetalle einschließlich Quecksilber in Fischereierzeugnissen z.Zt. ausschließlich über die Gesamtgehalte der einzelnen Elemente fest. Die Datenlage für das Vorkommen von Gesamt-Quecksilber in Fischen ist äußerst umfangreich. Ein gewichtiges Problem besteht allerdings darin, dass die Datenlage an spezierten, den Anteil an Methylquecksilber berücksichtigenden Untersuchungsergebnissen von Fischen deutlich hinter der für Gesamt-Quecksilber zurückfällt. Die genaue Kenntnis der Art ihrer chemischen Bindung (die sog. „Speziation“) im Gesamtmolekül wird jedoch zunehmend als wichtiges Kriterium für eine objektive Bewertung potenziell toxischer Elemente anerkannt. Unter den in Umweltproben vorkommenden Quecksilber-Verbindungen überragt die Spezies „Methylquecksilber“ alle übrigen an Giftigkeit. Im Auftrag der Europäischen Kommission hat die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) 2003 den vom Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) abgeleiteten Wert für die „vorübergehend tolerierbare wöchentliche Aufnahme“ (provisional tolerable weekly intake (PTWI)) mit 1,6 Mikrogramm Methylquecksilber pro Kilogramm Körpergewicht festgesetzt. Das National Research Council (NRC) der USA hat 2000 eine entsprechende Aufnahmegrenze (Intake Limit) von 0,7 µg/kg Körpergewicht festgesetzt.

Um den Forderungen der EU (EFSA, 18.03.2004) nach Einführung der Quecksilber-Speziesanalytik gerecht zu werden, haben das Bundesumweltministerium und das Bundesinstitut für Risikobewertung das Institut für Fischkunde (IFF) Cuxhaven des Niedersächsischen Landesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (LAVES) mit der Entwicklung einer routinefähigen Methode beauftragt. Das IFF Cuxhaven ist ein Schwerpunktinstitut für Fische und Fischereierzeugnisse innerhalb des LAVES und durch seine Expertise in der anorganischen und organischen Analytik von Fischereierzeugnissen bundesweit anerkannt.

Als am besten geeignetes Untersuchungsverfahren für die Spezies-Analytik von Quecksilber in Fischen und Fischereierzeugnissen hat sich eine Kopplung der Gaschromatographie mit der Kaltdampf-Atomfluoreszenz (GC-CVAFS) herausgestellt. In der jetzt in Cuxhaven entwickelten Version ist diese Methode robust, mengenmäßig leistungsfähig, vergleichsweise kostengünstig und bei entsprechender Ausstattung leicht von anderen Anwendern zu übernehmen.

Nach erfolgreicher Entwicklungsarbeit hat das Cuxhavener Institut mittels dieser Methode in den vergangenen zwei Jahren an die tausend Proben aus der gesamten Palette mariner bzw. aquatischer Organismen, die bei der menschlichen Ernährung eine Rolle spielen, untersucht. Somit stehen nunmehr neben den durch die klassische Methode „Gesamt-Quecksilber“ gewonnenen Daten auch die durch Speziesanalytik ermöglichten zusätzlichen Parameter „Methylquecksilber“ und „Anorganisches Quecksilber“ in großer Zahl zur Verfügung.

### **Verbesserter Verbraucherschutz**

Bei bisherigen Überwachungsmaßnahmen wurde – gestützt durch die derzeit geltenden rechtlichen Bestimmungen der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in

Lebensmitteln – Quecksilber in Lebensmitteln ausschließlich über den Parameter Gesamt-Quecksilber bewertet. Diesem Vorgehen lag eine Abschätzung zugrunde, nach welcher ein Anteil von 90 % als Methylquecksilber vorliegt. Die Erkenntnisse aus der aktuellen Cuxhavener Erhebung haben diese Annahme für eine Vielzahl von Proben bestätigt, aber auch gezeigt, dass manche Arten Quecksilber praktisch zu 100 % als Methylquecksilber enthalten. Daneben können einzelne Arten oder Individuen aber auch Anteile von < 50 % aufweisen. Bei mehreren kontaminationsträchtigen und dabei z.T. hochpreisigen Arten wie bestimmten Thunfischarten, Haien, Heilbutt, Schwertfisch, Buttermakrele u.a. ist die Bewertung nach erfolgter Speziesanalytik vorzuziehen, da bei Proben dieser Arten die Quecksilber-Spezies-Anteile erhebliche Streubreiten aufweisen und außerdem Abhängigkeiten von der Gesamt-Belastungshöhe gegeben sind. Die beiden Ziele „Effektiver Verbraucherschutz“ und „Vermeidung unnötiger Beanstandungen“ lassen sich u.E. nur durch Einbeziehung der Spezies-Analytik gleichberechtigt und gleichwertig in Einklang bringen.

#### **4. Danksagungen**

Bei folgenden Personen und Institutionen möchten wir uns an dieser Stelle bedanken:

- Dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und dem Bundesinstitut für Risikoberwertung (BfR) für die Erteilung des vorliegenden Forschungs- und Entwicklungsvorhabens.
- Unserer Mitarbeiterin Frau Angela Grabow (Chemielaborantin) für die Mitarbeit bei der Methodenentwicklung und bei der Durchführung der bisherigen Untersuchungen.
- Unserem Mitarbeiter Herrn Selver Rudi für die Mitarbeit bei der Probenvorbereitung.
- Dem Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (ehemals Bundesforschungsanstalt für Fischerei), Institut für Fischereiökologie – vertreten durch Herrn Dr. Michael Haarich – für die freundliche Überlassung von zahlreichen für uns sehr wertvollen Fischproben.

## 5. Zitierte Literatur

- 1: Kaiser, G., Tölg, G.: Mercury, The Handbook of Environmental Chemistry, Vol 3, Part A, 1 – 58 (1980)
- 2: Kudo, A., Turner, R.: Mercuri Contamination in Minamata Bay: Historical Overview and Progress towards Recovery, in: Ebinghaus, R. et al. (Eds.) Springer-Verlag Berlin, New York, 143-158 (1999)
- 3: Hatch, E.R., Ott, W.L.: Determination of Traces of Mercury by Cold Vapour Atomic Absorption Spectrometry, Anal. Chem. 40, 2085-2087 (1969)
- 4: Westöö, G.: Determination of Methylmercury Compounds in Foodstuff. I. Methylmercury Compounds in Fish. Identification and Determination. Acta Chem. Scand. 20, 2131-2138 (1966)
- 5: Westöö, G.: Determination of Methylmercury Compounds in Foodstuff. II. Determination of Methylmercury in Fish, Egg, Meat and Liver. Acta Chem. Scand. 21, 1790-1800 (1967)
- 6: Westöö, G.: Determination of Methylmercury Salts in Various Kinds of Biological Material. Acta Chem. Scand. 22, 2277-2280 (1968)
- 7: Bestimmung des Hg-Gehaltes der Seefische und anderer Meerestiere in Abhängigkeit von physiologischen Determinanten zur Analyse der Fangplätze und zur Durchführung einer lebensmittelrechtlichen Beurteilung der Seefische im Rahmen der Marktkontrolle. Abschlussbericht des Staatlichen Veterinäruntersuchungsamtes für Fische und Fischwaren Cuxhaven zum Forschungsauftrag des Bundesministers für Jugend, Familie und Gesundheit (1977)
- 8: Krüger, K.-E., Nieper, L.: Bestimmung des Hg-Gehaltes der Seefische auf den Fangplätzen der deutschen Hochsee- und Küstenfischerei. Arch. Lebensmittelhyg. **29**, 165 – 168 (1978)
- 9: Kruse, R., Krüger, K.-E.: Durchführung einer Dreijahresstudie über die Quecksilberbelastung der für den deutschen Markt wichtigsten Fischarten aus ausgewählten Fangplätzen des Nordatlantiks. Abschlussbericht des Staatlichen Veterinäruntersuchungsamtes für Fische und Fischwaren Cuxhaven zum Forschungsauftrag des Bundesgesundheitsamtes (1988)
- 10: Harms, U., Bunke, M.: Ausarbeitung und Validierung einer Methode zur Bestimmung von Monomethylquecksilber und anorganischem Quecksilber in Fischgewebe und Zooplankton. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsbericht FKZ 200 22 230 – Dezember 2002
- 11: Heumann, K.G. Elemental Species Analysis with Isotope Dilution Mass Spectrometry, in: Broekaert, J.A.C., Gücer, S., Adams, Metall speciation in the Environment. Springer Verlag, Heidelberg, 153-168 (1990)
- 12: Demuth, N. Massenspektrometrische Isotopenverdünnungsanalyse (MSIVA) als Validierungsmethode für Bestimmungsmethoden von Methylquecksilber mittels GC/ICP-MS. Dissertation an der Johannes Gutenberg Universität, Mainz (2001)
- 13: Küllmer, K.: Weiterentwicklung einer GC/AFD-Methode zur Bestimmung von Methylquecksilberverbindungen in der Umwelt und deren Anwendung in anthropogen beeinflussten und unbeeinflussten Regionen. Dissertation an der Johannes Gutenberg Universität, Mainz (2002)

14: Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln, Amtsblatt der Europäischen Union, L 364/5

15: Fischinformationszentrum (FIZ): Daten und Fakten, Ausgabe 2004 (zu beziehen über das Fischinformationszentrum, Große Elbstr. 133, D-22767 Hamburg)

## **6. Eigene Vorabveröffentlichungen von Teilen des Vorhabens**

Kruse, R.: Automated determination of Hg-species in marine biota by means of GC-CVAFS after TMAH-digestion and solvent stripping as serial sample preparation procedure. Posterpräsentation auf der ICES annual science conference 19.-23.09.2006, Maastricht, the Netherlands

Kruse, R.: Automated multiple determination of Hg-species in marine biota by GC-CVAFS after TMAH digestion and solvent stripping. Posterpräsentation auf der „Tracespec“, 04.-06.09.2007, Universität Münster

Kruse, R., Bartelt, E., Grabow, A.: Determination of Hg-species in commercial fish by GC-CVAFS after TMAH digestion and solvent stripping. Vortrag auf der “WEFTA 2007”, 37<sup>th</sup> WEFTA annual meeting, Lissabon, Portugal, 24.-27.10.2007

## **7. Kontakt (Korrespondenzanschrift)**

Dr. Reinhard Kruse (Diplom-Chemiker)  
Niedersächsisches Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (LAVES)  
– Institut für Fische und Fischereierzeugnisse Cuxhaven (IFF Cux) -  
Schleusenstraße 1  
D-27472 Cuxhaven  
Tel.: 0 47 21/69 89 25  
E-Mail: Reinhard.Kruse@Laves.Niedersachsen.de