



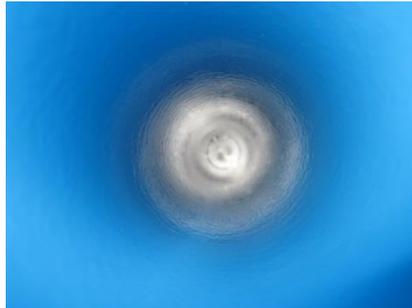
Anwendung statistischer Versuchsplanung und multivariater Datenanalyse zur Charakterisierung von Trinkwasserrohren aus Kunststoffen

WaBoLu Wasserkurs Berlin 10.11.2016

Dr. Alexander Thieme

Überblick

- Motivation
- Grundlagen
- Methodik
- Ergebnisse
- Zusammenfassung



Motivation

- Trinkwasser ist wichtigstes **Lebensmittel** und nicht nur „Nahrungsmittel“
- Trinkwasser aus dem Wasserhahn ist in Deutschland eine **Selbstverständlichkeit**
- Beschwerden über Verunreinigungen treten direkt in Gebäuden bei Abnehmern auf
 - Hohe Anzahl verschiedener Materialien
 - Ungünstiges Oberflächen/ Volumenverhältnis (O/V)



Trinkwasser aus dem Wasserhahn¹



¹www.heute.de/ZDF/zdfportal/blob/44578256/4/data, aufgerufen am 28.10.2016

Motivation

- 2010: Geruch- und Geschmacksbeeinträchtigungen des Trinkwassers im Raum Erfurt
- Gemeinsamkeit bei allen Fällen:
 - Neuerlegte Rohre aus **peroxidisch-vernetztem Polyethylen (PE-Xa)**
- **Ursache: materialbürtige Substanzen migrieren in das Trinkwasser**
- Einzelstoffe bereits mehrfach/ verschiedenen Forschern nachgewiesen²⁻⁵
 - **Methyl-*tert.*-butylether (MTBE)**
 - **Ethyl-*tert.*-butylether (ETBE)**
 - **Di-*tert.*-butylperoxid (DTBP)**

²Brocca et al. Water research (2002) 3675–3680 ³Kelley et al. Water research (2014) 19–32 ⁴Lund et al. Journal of water and health (2011) 483–497
⁵Skjevrak et al. Water research (2003) 1912–1920

Motivation

- Einzelstoffe bereits mehrfach von verschiedenen Forschern nachgewiesen²⁻⁵
 - **Tert.-Butylalkohol (TBA)**
 - **Toluol**
 - **2,4-Di-tert.-butylphenol (2,4-DTBP)**
- **Signifikante Einflussgrößen/ Effekte auf Migrationsverhalten unbekannt**
- **Berücksichtigung der praxisnahen Bedingungen**
- **Toxizitätsabschätzung häufig unzureichend**
- **Frage nach weiteren materialbürtigen Substanzen**

²Brocca et al. Water research (2002) 3675–3680 ³Kelley et al. Water research (2014) 19–32 ⁴Lund et al. Journal of water and health (2011) 483–497

⁵Skjevrak et al. Water research (2003) 1912–1920

Rechtliche Grundlagen

- **Nach TrinkwV 2001 § 17** : „Werkstoffe und Materialien, [...] die Kontakt mit Trinkwasser haben, dürfen nicht den Geruch oder Geschmack des Wassers nachteilig verändern.“⁶
- **Prüfung auf hygienische Unbedenklichkeit:**
 - Leitlinien des Umweltbundesamtes (Überführung in rechtsverbindliche Bewertungsgrundlagen nach § 17 Abs. 3 TrinkwV 2001)
 - DIN-Prüfverfahren (DIN EN 12873-1; DIN EN 1622)
 - Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW)
- **Durchführung der Prüfung**
 - Akkreditierte Prüfstelle
 - Akkreditierten Zertifizierer anerkannten Prüfstelle

⁶Verordnung über die Qualität von Trinkwasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001): Bekanntmachung der Neufassung der Trinkwasserverordnung. Bundesgesetzblatt 2013 (46), 2977–3004

Genormte Prüfungen

chemische Untersuchungen

KTW-Leitlinie (07.03.2016)

Prüfkörper-
vorbereitung

- Spül- & Vorbehandlungsphasen

Prüfung

- Migrationstest mit
deionisiertem Wasser
(min. 3 x 72 Stunden, $23 \pm 2 \text{ °C}$)

Bewertung

- Grundanforderungen
(äußere Beschaffenheit &
Summenparameter)
- Zusatz- & rezepturspezifische
Einzelstoffanforderungen

mikrobiologische Prüfung

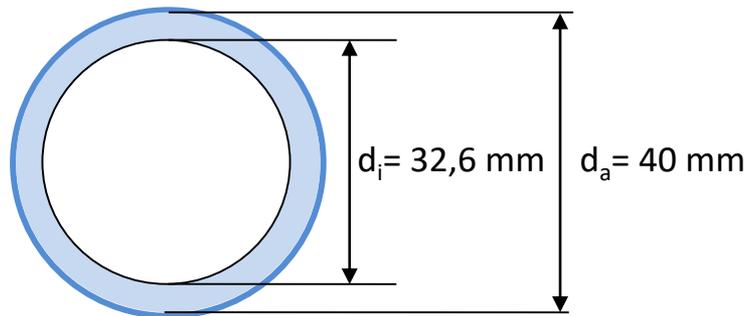
DVGW Arbeitsblatt W 270/ DIN EN 16421

- Bestimmung mikrobiellen Wachstums
auf organischen Materialien
- Permanente Durchströmung der
Prüfkörper mit chlorfreiem Wasser
(min. 3 Monate)
- Besiedlung Oberfläche notwendig
- Oberflächenbewuchs unerwünscht

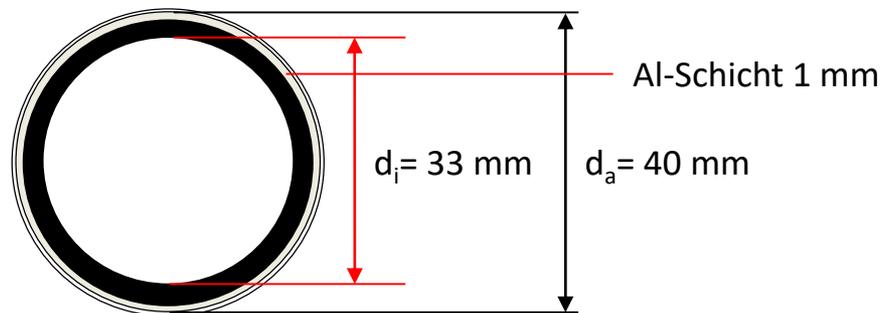
Geprüfte Materialien im Rahmen der Dissertation

- **Auswahl von fünf kommerziell eingesetzten Rohrmaterialien**

1. PE-Xa (peroxidisch-vernetztes Polyethylen)

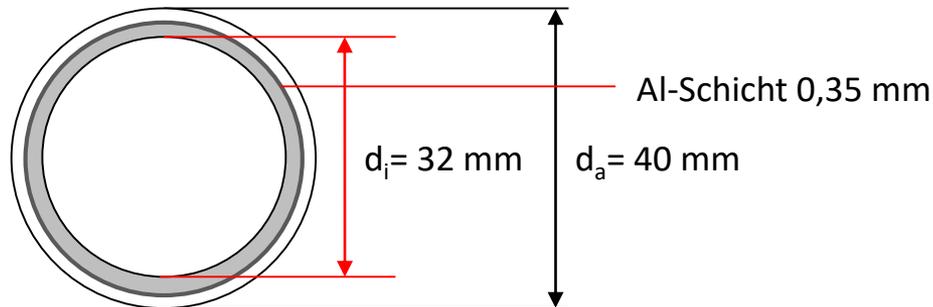


2. PE-Xc (physikalisch-vernetztes Polyethylen)

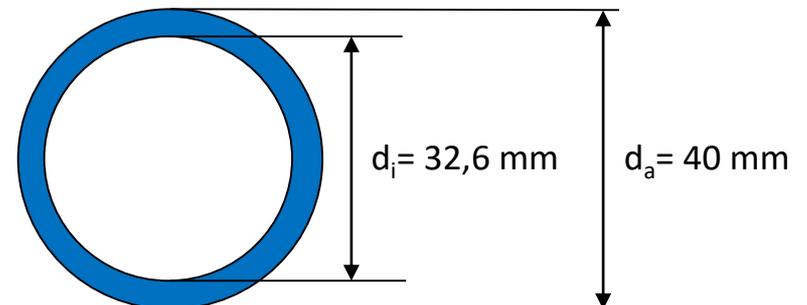
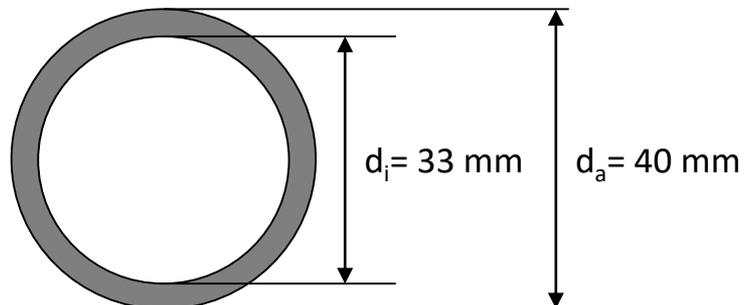


Geprüfte Materialien

3. PE-RT (Polyethylen mit erhöhter Temperaturbeständigkeit)



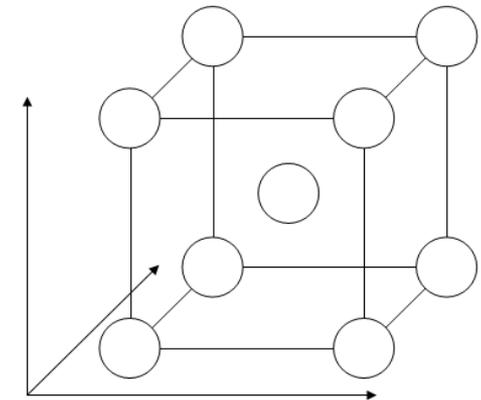
4. & 5. PE-HD (zwei unterschiedliche Hersteller)



Methodik I (statistische Versuchsplanung SVP + GC-MS)

- Wichtigste Einflussgrößen/ Faktoren auf das Migrationsverhalten
 - Wassertemperatur, Stagnationszeit, Desinfektionsmittel ClO₂
- Erstellung eines vollständigen **2³-Faktorenplans + Zentralpunkt**

Faktor	Faktorstufen		
	-	0	+
Wassertemperatur	30 °C	35 °C	40 °C
Stagnationszeit	24 h	60 h	96 h
Desinfektionsmittel ClO ₂	0,30 mg/l	0,45 mg/l	0,60 mg/l



Faktorstufenkombination eines 2³-Plans mit Zentralpunkt

- Durchführung nach KTW-Leitlinie
 - **Abweichung: Verwendung Trinkwasser - kein deionisiertes Wasser!**
- Untersuchungsumfang: 115 Versuche

Methodik I (statistische Versuchsplanung SVP + GC-MS)

Planmatrix				Matrix der unabhängigen Variablen x_i								Antwortmatrix (abhängige Variable)
unabhängige Variable	1	2	3	0	1	2	12	3	13	23	123	y_i
Versuchs-Nr.				I								
1	-	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	y_1
2	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	y_2
3	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	y_3
4	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	y_4
5	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	y_5
6	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	y_6
7	-	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	y_7
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	y_8
Effektmatrix												

$$Effekt = \frac{\sum x_i y_i}{\frac{N}{2}}$$

$$b_i = \frac{\sum x_i y_i}{N} = \frac{Effekt}{2}$$

 $y_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 + b_4 x_3 + b_5 x_1 x_3 + b_6 x_2 x_3 + b_7 x_1 x_2 x_3$

Methodik II (LC-HRMS + Hauptkomponentenanalyse)

- Messung einer Stagnationsprobe jedes Materials mit TripleTOF® 5600 System (AB Sciex)
 - Alle Faktoren auf oberer Stufe
- Auswertung Datensätze durch Hauptkomponentenanalyse mittels interner Gerätesoftware

Zerlegung der Datenmatrix

$$\begin{matrix} n & & m \\ \boxed{X} & = & \boxed{F} \cdot m \boxed{A^T} \\ \text{Datenmatrix} & & \begin{matrix} \text{Werte der} \\ \text{Hauptkomponenten} \\ \text{(Scores)} \end{matrix} & & \begin{matrix} \text{Transponierte Matrix} \\ \text{der Koeffizienten} \\ \text{(Ladungen)} \end{matrix} \end{matrix}$$



TripleTOF® 5600

- Ursprungsvariablen → voneinander unabhängige Hauptkomponenten (**Dimensionsreduzierung**)
- **Gesamtvarianz** des Datensatzes erklärt (**varianzorientiert**)

Fragestellungen

1. Welche Schlussfolgerungen ergeben sich nach der genormten Prüfung aller Materialien?
2. Welche Faktoren beeinflussen am häufigsten/ stärksten das Migrationsverhalten der bekannten materialbürtigen Stoffe?
3. Inwieweit unterscheiden sich die bestimmten Konzentrationen der Analyten durch die beiden Prüfmethoden?
4. Besteht ein Zusammenhang zwischen Befunden von MTBE/ ETBE und auftretender Geschmacks- bzw. Geruchsbeeinträchtigung?
5. Zeigt sich ein Zusammenhang zwischen den untersuchten Rohrmaterialien und deren Abgabe von unbekanntem Analyten?
6. Wie toxisch sind die materialbürtigen Stoffe im Trinkwasser für den Menschen?

Fragestellungen

1. Welche Schlussfolgerungen ergeben sich nach der genormten Prüfung aller Materialien?
2. Welche Faktoren beeinflussen am häufigsten/ stärksten das Migrationsverhalten der bekannten materialbürtigen Stoffe?
3. Inwieweit unterscheiden sich die bestimmten Konzentrationen der Analyten durch die beiden Prüfmethoden?
4. Besteht ein Zusammenhang zwischen Befunden von MTBE/ ETBE und auftretender Geschmacks- bzw. Geruchsbeeinträchtigung?
5. Zeigt sich ein Zusammenhang zwischen den untersuchten Rohrmaterialien und deren Abgabe von unbekanntem Analyten?
6. Wie toxisch sind die materialbürtigen Stoffe im Trinkwasser für den Menschen?

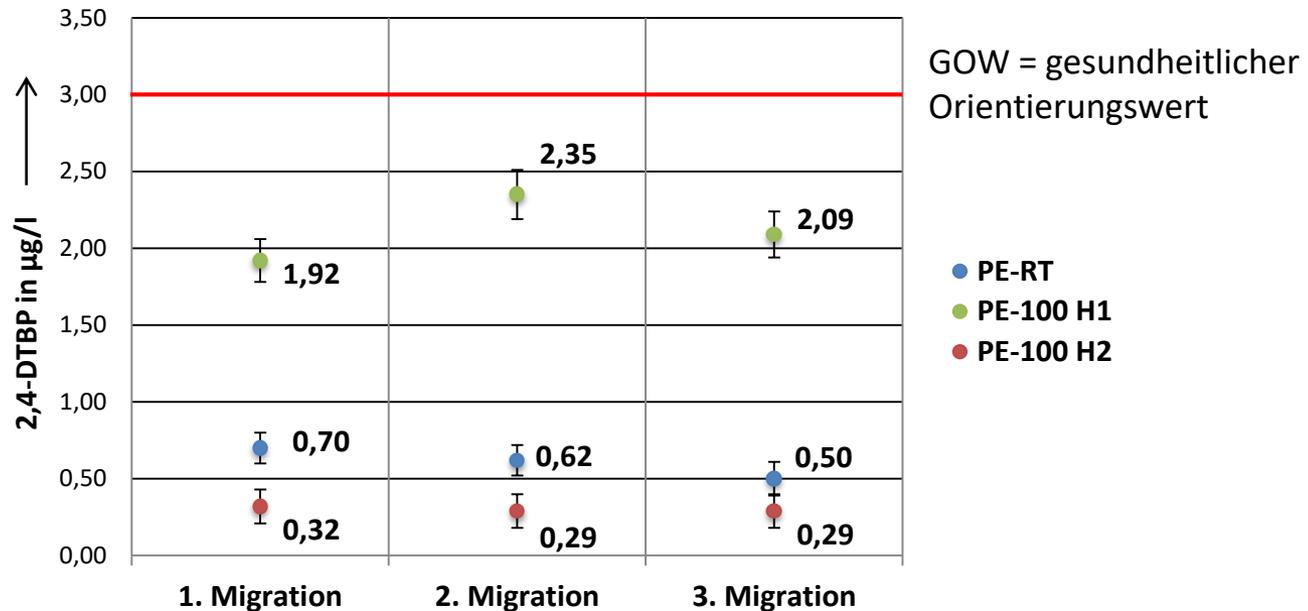
Ergebnisse der Prüfung nach genormten Versuchsbedingungen

- **Beurteilung der Grundanforderungen**

- Äußere Beschaffenheit zu keinem Zeitpunkt verändert
- Maßnahmewerte: threshold odour number (TON) eingehalten
- Keine organoleptische Beeinträchtigung
- Max. Migrationsrate (TOC): 25 $\mu\text{g}/\text{dm}^2\cdot\text{d}$

Kunststoffmaterial	TOC-Migrationsrate M_n in $\mu\text{g}/\text{dm}^2\cdot\text{d}$
PE-Xa	8
PE-Xc	8
PE-RT	7
PE-100 H1	11
PE-100 H2	6

Ergebnisse der Prüfung nach genormten Versuchsbedingungen



Vergleich der Konzentrationen von 2,4-DTBP in µg/l aus verschiedenen Kunststoffrohren

- Nur **tert.-Butylalkohol (TBA)**, **Toluol** und **2,4-Di-tert.-butylphenol (2,4-DTBP)** nachgewiesen
- Bildung eines Oberflächenbewuchses negativ
 - Potenzielles Habitat für Mikroorganismen ausgeschlossen
- **Zertifizierte Materialien für die Trinkwasserinstallation**

Fragestellungen

1. Welche Schlussfolgerungen ergeben sich nach der genormten Prüfung aller Materialien?
2. **Welche Faktoren beeinflussen am häufigsten/ stärksten das Migrationsverhalten der bekannten materialbürtigen Stoffe?**
3. Inwieweit unterscheiden sich die bestimmten Konzentrationen der Analyten durch die beiden Prüfmethoden?
4. Besteht ein Zusammenhang zwischen Befunden von MTBE/ ETBE und auftretender Geschmacks- bzw. Geruchsbeeinträchtigung?
5. Zeigt sich ein Zusammenhang zwischen den untersuchten Rohrmaterialien und deren Abgabe von unbekanntem Analyten?
6. Wie toxisch sind die materialbürtigen Stoffe im Trinkwasser für den Menschen?

Migrationsverhalten

Nachgewiesene materialbürtige Substanzen (Versuche nach SVP)

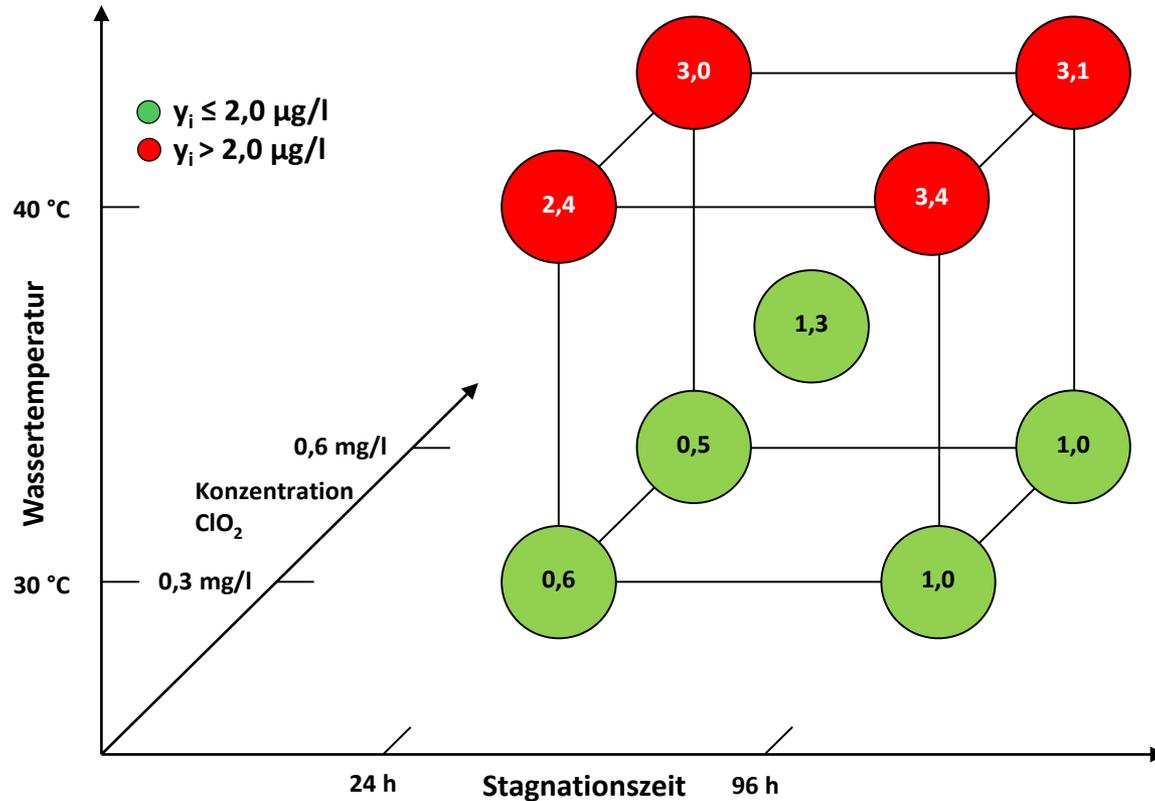
Rohrmaterial	organische Substanzen						
	MTBE	ETBE	DTBP	TBA	Aceton	Toluol	2,4-DTBP
PE-Xa	●	○	●	●	○ ^a	○	○
PE-Xc	○	●	○	●	●	●	○
PE-RT	○	○	○	●	○	●	○ ^a
PE-100 H1	○	○	○	●	○	○	●
PE-100 H2	○	○	○	○ ^a	○	○	●

● nachgewiesen; ○ nicht nachgewiesen; ^a nur in Versuchen mit 40 °C Wassertemperatur nachgewiesen

- Stagnationszeit und Wassertemperatur häufig entscheidende (signifikante) Faktoren
- Ausnahme: **tert.-Butylalkohol (TBA)**
 - Konzentration von ClO₂ signifikant (materialabhängig)
- Einflussgrößen immer positives Vorzeichen in Regressionsgleichung
- Große Spannweite der Analyseergebnisse beobachtet

Migrationsverhalten – Toluol

- Wasserproben im Kontakt mit PE-RT-Rohren

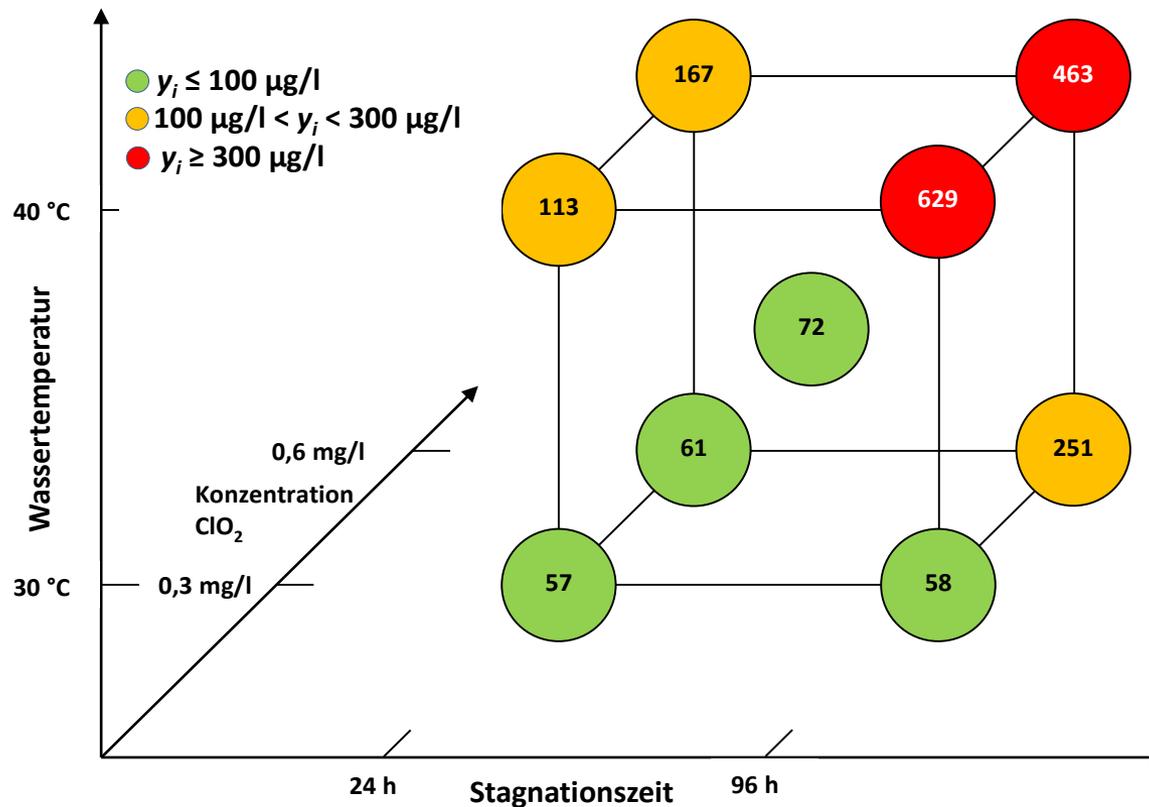


Regressionsgleichung: $y(\text{Toluol}) = 1,84 + 1,09x_{WT} + 0,26x_{Stag}$ (P= 95 %)

Thieme et al. akzeptiert

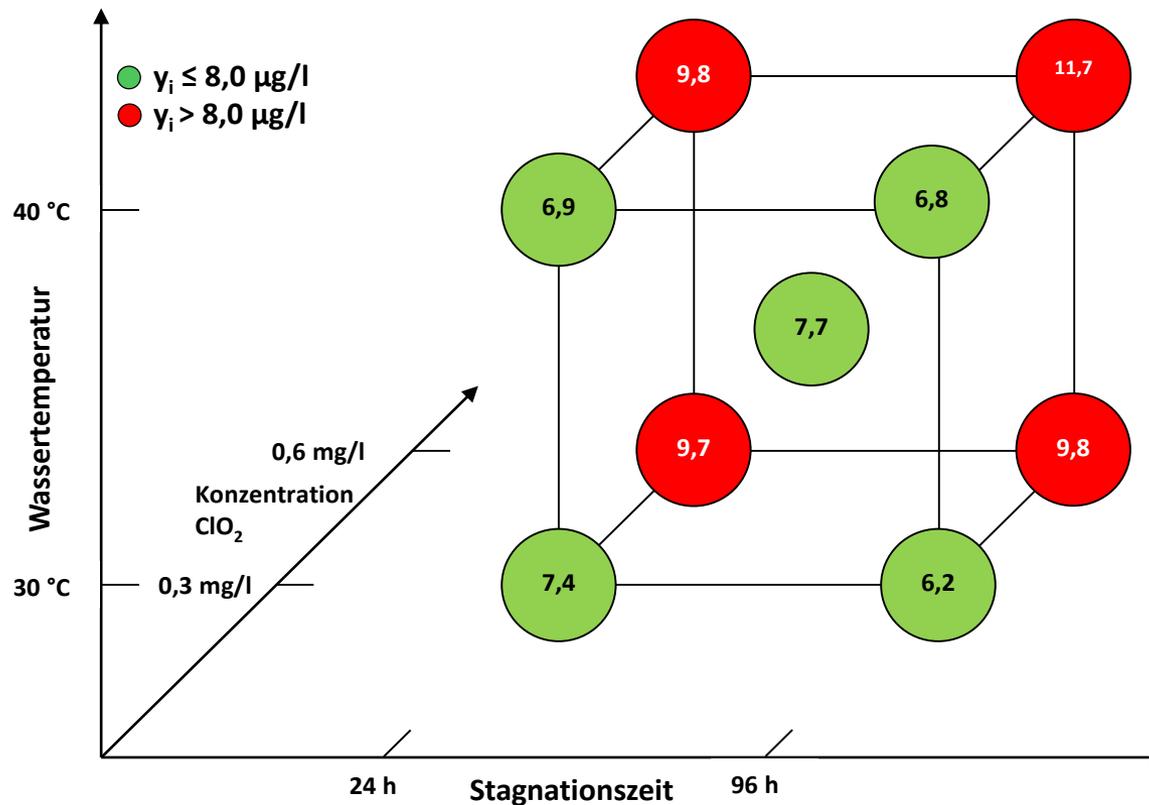
Migrationsverhalten – *tert.*-Butylalkohol (TBA)

- Vergleich zwischen den Materialien (Wasserproben im Kontakt mit **PE-Xa**- und PE-RT-Rohren)



Migrationsverhalten – *tert.*-Butylalkohol (TBA)

- Vergleich zwischen den Materialien (Wasserproben im Kontakt mit PE-Xa- und PE-RT-Rohren)



Thieme et al. *akzeptiert*

Fragestellungen

1. Welche Schlussfolgerungen ergeben sich nach der genormten Prüfung aller Materialien?
2. Welche Faktoren beeinflussen am häufigsten/ stärksten das Migrationsverhalten der bekannten materialbürtigen Stoffe?
3. **Inwieweit unterscheiden sich die bestimmten Konzentrationen der Analyten durch die beiden Prüfmethoden?**
4. Besteht ein Zusammenhang zwischen Befunden von MTBE/ ETBE und auftretender Geschmacks- bzw. Geruchsbeeinträchtigung?
5. Zeigt sich ein Zusammenhang zwischen den untersuchten Rohrmaterialien und deren Abgabe von unbekanntem Analyten?
6. Wie toxisch sind die materialbürtigen Stoffe im Trinkwasser für den Menschen?

Vergleich KTW-Prüfung/ SVP -Versuche

- **Konzentrationen der Substanzen**
 - Höher SVP-Versuchen
 - Niedriger genormter Prüfung
 - **Ausnahme**
2,4-Di-*tert.*-butylphenol (2,4-DTBP)
- **Begründung**
 - Erhöhung der Temperatur
 - Verlängerung der Stagnationszeit
 - Verwendung Trinkwasser anstatt deionisiertem Wasser

<i>tert.</i> - Butylalkohol (TBA) in µg/l		
Material	SVP-Versuche \bar{Y}_{ZP}	KTW-Prüfung 3. Migrationsphase
PE-Xa	72 ± 4	5,7 ± 3,2
PE-Xc	13 ± 2	n.b.
PE-RT	7,7 ± 2,5	n.b.
PE-100 H1	5,5 ± 3,6	n.b.
PE-100 H2	n.b.	n.b.

Vergleich Konzentrationen *tert.*- Butylalkohol (TBA) zwischen beiden Methoden

Fragestellungen

1. Welche Schlussfolgerungen ergeben sich nach der genormten Prüfung aller Materialien?
2. Welche Faktoren beeinflussen am häufigsten/ stärksten das Migrationsverhalten der bekannten materialbürtigen Stoffe?
3. Inwieweit unterscheiden sich die bestimmten Konzentrationen der Analyten durch die beiden Prüfmethoden?
4. **Besteht ein Zusammenhang zwischen Befunden von MTBE/ ETBE und auftretender Geschmacks- bzw. Geruchsbeeinträchtigung?**
5. Zeigt sich ein Zusammenhang zwischen den untersuchten Rohrmaterialien und deren Abgabe von unbekanntem Analyten?
6. Wie toxisch sind die materialbürtigen Stoffe im Trinkwasser für den Menschen?

Organoleptische Parameter

Versuchsnummer (PE-Xa)	MTBE in µg/l	TON	Geruch qualitativ	Geschmack qualitativ
1	1,2 ± 0,7	< 1	kein Befund	kein Befund
2	2,1 ± 0,7	< 1	kein Befund	kein Befund
3	1,3 ± 0,7	< 1	kein Befund	kein Befund
4	10,8 ± 0,6	< 1	kein Befund	schwach süßlich
5	1,2 ± 0,7	< 1	kein Befund	kein Befund
6	2,9 ± 0,7	1	schwach aromatisch	kein Befund
7	5,0 ± 0,6	< 1	kein Befund	kein Befund
8	8,9 ± 0,6	< 1	kein Befund	schwach süßlich

- **Korrelation zwischen MTBE-Konzentration/ Geschmack ersichtlich (PE-Xa)**
- **Geschmacksschwellenwerte:**
MTBE: 9 - 48 µg/l, ETBE: 2 - 47 µg/l⁷⁻⁹
- **Zusammenhang hohen TON-Werten und Konzentration ETBE nicht nachweisbar (PE-Xc)**
- **Andere Stoffe/ Stoffgemische Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigung verantwortlich**

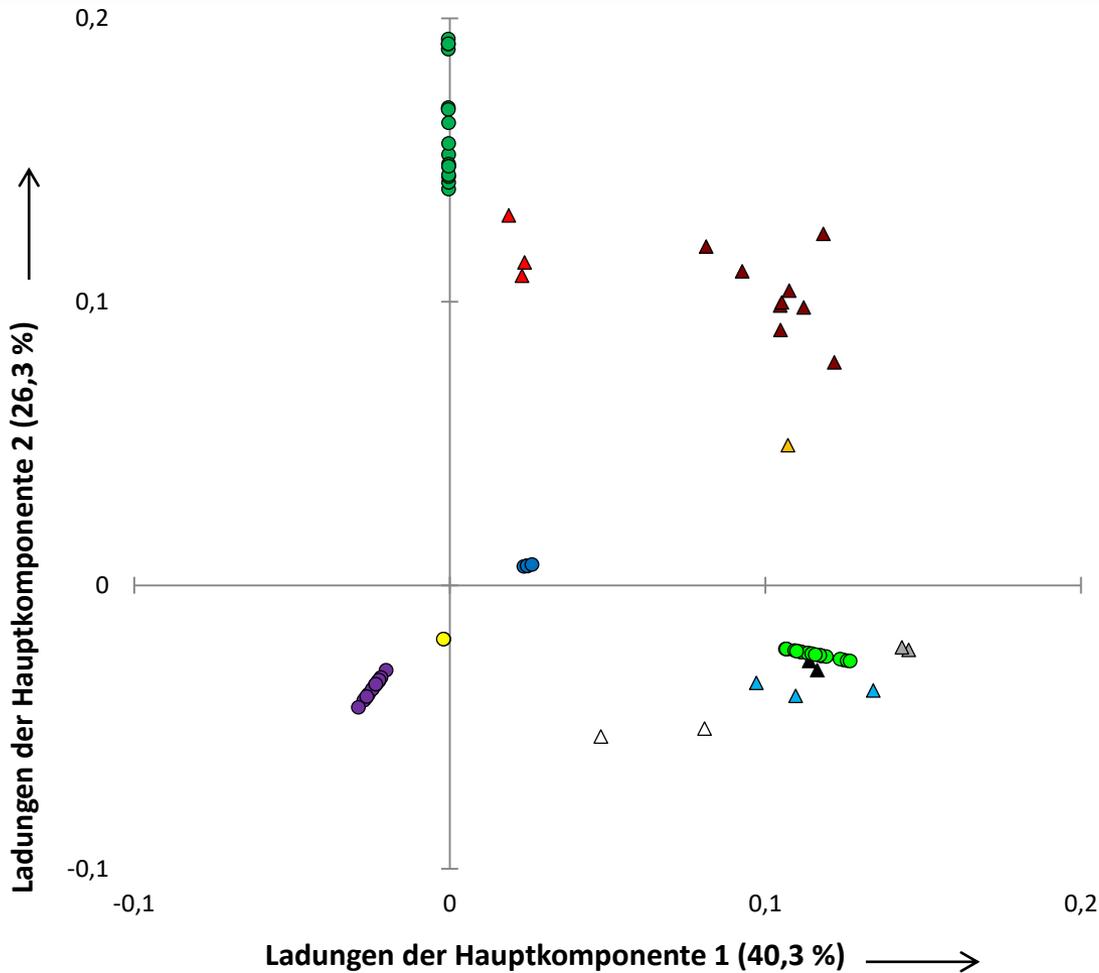
Rohrmaterial	organoleptische Parameter			
	TON	Geruch (qualitativ)	Geschmack (qualitativ)	
PE-Xa	< 1	○	●	
PE-Xc	≥ 1	●	●	
PE-RT	< 1	○	○	
PE-100 H1	≥ 1	●	●	
PE-100 H2	< 1	○	○	● vorhanden ○ kein Befund

⁷ US EPA, The report of the Blue Ribbon Panel on Oxygenates in Gasoline (1999), ⁸ Prah et al. Inhalation Toxicology (1994) 521-538, ⁹ Young et al. Water research (1996) 331-340

Fragestellungen

1. Welche Schlussfolgerungen ergeben sich nach der genormten Prüfung aller Materialien?
2. Welche Faktoren beeinflussen am häufigsten/ stärksten das Migrationsverhalten der bekannten materialbürtigen Stoffe?
3. Inwieweit unterscheiden sich die bestimmten Konzentrationen der Analyten durch die beiden Prüfmethoden?
4. Besteht ein Zusammenhang zwischen Befunden von MTBE/ ETBE und auftretender Geschmacks- bzw. Geruchsbeeinträchtigung?
5. **Zeigt sich ein Zusammenhang zwischen den untersuchten Rohrmaterialien und deren Abgabe von unbekanntem Analyten?**
6. Wie toxisch sind die materialbürtigen Stoffe im Trinkwasser für den Menschen?

Hauptkomponentenanalyse

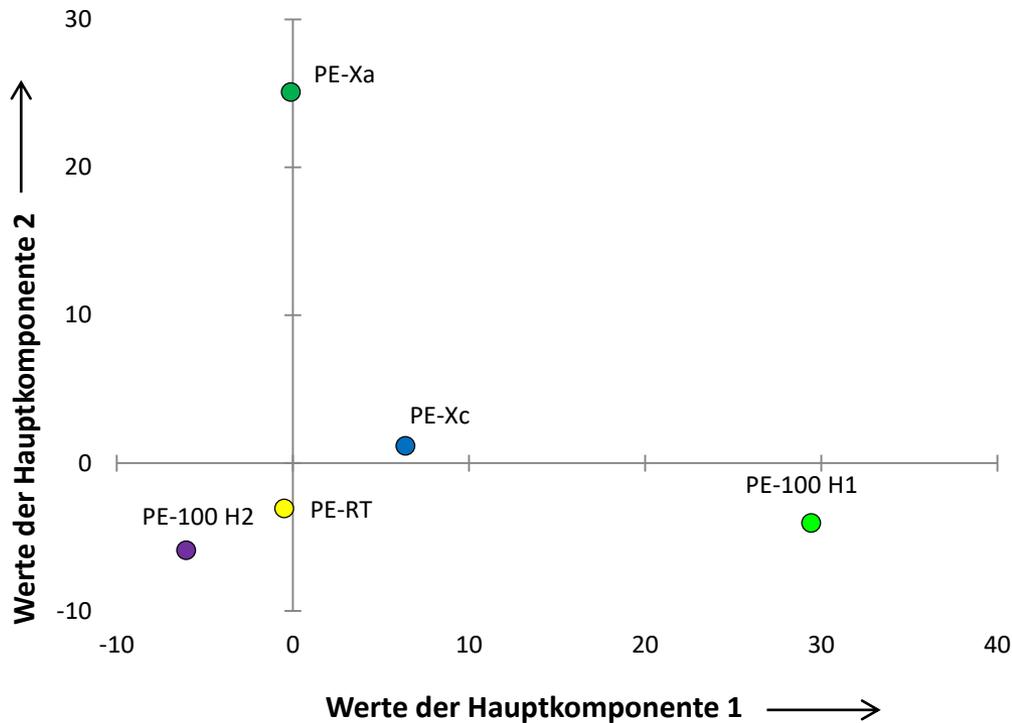


● PE-Xa	● PE-Xc
● PE-RT	● PE-100 H1
▲ alle Materialien	● PE-100 H2
▲ PE-100 H1 PE-RT	△ PE-100 H1 PE-100 H2
▲ PE-Xa PE-Xc	PE-Xa ▲ PE-Xc PE-100 H1
△ PE-Xc PE-100 H1	PE-Xc ▲ PE-100 H1 PE-RT

Ladungsplot der Hauptkomponenten des Datensatzes aus ESI + MS-Messung

Thieme et al. *in Vorbereitung*

Hauptkomponentenanalyse



- Auftrennung beider PE-100-Rohre durch Hauptkomponente 1
- Unterscheidung von PE-Xa-Material mit Hauptkomponente 2

Werteplot der Hauptkomponenten des Datensatzes aus ESI + MS-Messung

Thieme et al. *in Vorbereitung*

Fragestellungen

1. Welche Schlussfolgerungen ergeben sich nach der genormten Prüfung aller Materialien?
2. Welche Faktoren beeinflussen am häufigsten/ stärksten das Migrationsverhalten der bekannten materialbürtigen Stoffe?
3. Inwieweit unterscheiden sich die bestimmten Konzentrationen der Analyten durch die beiden Prüfmethode?
4. Besteht ein Zusammenhang zwischen Befunden von MTBE/ ETBE und auftretender Geschmacks- bzw. Geruchsbeeinträchtigung?
5. Zeigt sich ein Zusammenhang zwischen den untersuchten Rohrmaterialien und deren Abgabe von unbekanntem Analyten?
6. **Wie toxisch sind die materialbürtigen Stoffe im Trinkwasser für den Menschen?**

Toxizität der materialbürtigen Stoffe

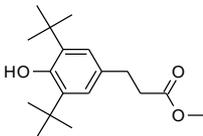
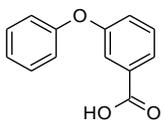
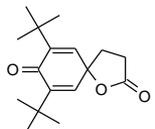
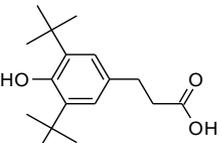
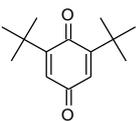
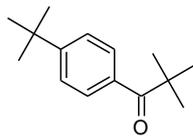
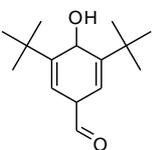
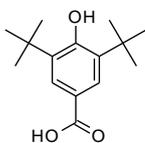
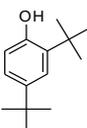
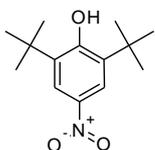
- **Anwendung des Threshold of Toxicological Concern“ (TTC)-Konzepts**
 - Grundgedanke: Toxizitätswahrscheinlichkeit steht mit dem Ausmaß und der Dauer der Exposition gegenüber einem Stoff in Beziehung
- **Toxizitätsabschätzung anhand der chemischen Struktur**
 - Einordnung drei Kategorien (wenig, mäßig und hoch toxisch) (Cramer - Klassen)¹⁰
 - Munro et al.¹¹: Generische Schwellenwerte festgelegt (NOEL-Werte von 612 Verbindungen)
- **European Food Safety Authority (EFSA)**

„Nützliches Screening-Instrument bei der Risikobewertung von chemischen Stoffen“, und erlaubt „Beratung in Fällen zu leisten, in denen keine Daten aus Toxizitätstest vorliegen“.¹²

¹⁰ Cramer et al. Food and Cosmetics Toxicology 1976, 16 (3), 255–276; ¹¹ Munro et al. Food and Chemical Toxicology 1996, 34 (9), 829–867

¹² EFSA, EFSA gibt Hinweise zur möglichen Anwendung des TTC-Konzepts bei der Risikobewertung von chemischen Stoffen, Bericht (2012)

Toxizität der materialbürtigen Stoffe

Strukturformel	detektierte Substanz	Cramer-Klasse	TTC-Wert in $\mu\text{g/kg KM/ Tag}$	mögliche Strukturformel	Substanz	Cramer-Klasse	TTC-Wert in $\mu\text{g/kg KM/ Tag}$
	Methyl-3-(3,5-di- <i>tert.</i> -butyl-4-hydroxyphenyl)-propionat	II	9		3-Phenoxybenzoesäure	III	1,5
	7,9-Di- <i>tert.</i> -butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-dien-2,8-dion	III	1,5		3-(3,5-Di- <i>tert.</i> -butyl-4-hydroxyphenyl)propionsäure	II	9
	2,6-Di- <i>tert.</i> -butyl-1,4-benzochinon	II	9		<i>p-tert.</i> -Butyl pivaloylphenon	I	30
	3,5-Di- <i>tert.</i> -butyl-4-hydroxybenzaldehyd	II	9		3,5-Di- <i>tert.</i> -butyl-2-hydroxybenzoesäure	II	9
	2,4-Di- <i>tert.</i> -butylphenol	I	30		2,6-Di- <i>tert.</i> -butyl-4-nitrophenol	III	1,5

Toxizitätsabschätzung der identifizierten Analyten auf Grund ihrer chemischen Struktur aus der GC-MS (links) und LC-HRMS-Analyse (rechts)

Zusammenfassung

- **Bestätigung der genormten Prüfung**
 - ➔ **Zugelassene Materialien für Kontakt mit Trinkwasser**
- **Häufigste signifikante Einflussgrößen auf Migrationsverhalten**
 - ➔ **Wassertemperatur und Stagnationszeit**
- **Gemessene Konzentrationen materialbürtiger Stoffe aus SVP-Versuchen generell höher**
- **Zusammenhang zwischen MTBE-Konzentrationen und Geschmacksbeeinträchtigung beobachtet**
- **Zahlreiche unbekannte Verbindungen durch LC-HRMS-Analyse nachgewiesen**
- **Gruppierungen von Analyten und Materialien beobachtet**
- **Belastung vorhanden ➔ gesundheitliche Gefährdung gering**

Ausblick

- weitere Untersuchungen nötig
 - **Unbekannte Stoffe, Metabolisierung, Toxizität, usw.**

- Einheitliches Vorgehen in Europa (4-MS) wünschenswert

Zum Beispiel:

- Eigen- und Fremdüberwachung der Hersteller
 - Konsistentes Zulassungssystem
- Kommunikation zwischen Herstellern, Installateur und Nutzern verbessern
 - Austausch schadhafter Rohre im Versorgungsnetz
 - **Jedoch mit großem finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden**

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Dr. Alexander Thieme

Tel. 036257-43-0

Fax 036257-43-129

a.thieme@iwu-luisenthal.de

GWA Gesellschaft für Wasser und
Abwasserservice mbH

NL Institut für Wasser und Umweltanalytik

An der Ohratalsperre, 99885 Luisenthal

www.iwu-luisenthal.de

