

RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DIE MISCHUNG VON TRINKWÄSSERN

96

TZW
Technologiezentrum
Wasser



RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DIE MISCHUNG VON TRINKWÄSSERN

Abschlussbericht (DVGW-Förderkennzeichen W 201903)

Bearbeiter: Dr. Sebastian Hesse
TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

Dr. Angelika Becker
IWW Zentrum Wasser, Mülheim an der Ruhr

Dr. Dieter Stetter
IWW Zentrum Wasser, Mülheim an der Ruhr

Juni 2021

Impressum

Veröffentlichungen aus dem DVGW-Technologiezentrum Wasser
Band 96: Rahmenbedingungen für die Mischung von Trinkwässern
ISSN: 1434-5765

Herausgeber TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser
und Redaktion: Karlsruher Straße 84
 D-76139 Karlsruhe

Telefon: (07 21) 96 78-0
Telefax: (07 21) 96 78-101
Web: <http://www.tzw.de>
E-Mail: info@tzw.de

Druck: Stober GmbH - Druckerei und Verlag
 Industriestraße 12
 76344 Eggenstein

Vorwort

Die Mischbarkeit von Trinkwässern spielt aus korrosionschemischer Sicht eine wesentliche Rolle. Die Problematik der Unterschiedlichkeit von Wässern als Folge von Qualitätseinbußen beim Transport des Wassers durch das Verteilungsnetz zum Verbraucher wurde schon früh, d.h. Ende des 19. bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts erkannt. Die Probleme der Trinkwasserqualität betrafen vor allem die Rostwasserbildung, Trübungserscheinungen und Geschmackseinbußen des Wassers. Konzeptionell wird die Mischung von zwei oder mehreren Wässern durch das DVGW-Arbeitsblatt W 216 geregelt, wobei Hinweise und Vorgaben anhand von Bewertungsmaßstäben zur Wasserchemie und zu den technischen Maßnahmen zur Vermeidung von Korrosions- und Qualitätsproblemen vorgegeben werden.

Die Bewertungsgrundlage des aktuellen Arbeitsblattes W 216 basiert im Wesentlichen auf dem wissenschaftlichen Kenntnisstand aus dem Zeitraum der 1980er und 1990er Jahre. Das Arbeitsblatt wurde im Jahr 2004 aus Anlass der Neuregelung der Trinkwasserverordnung 2001 überarbeitet und aktualisiert. Aufgrund des Alters des Arbeitsblattes, das mittlerweile 16 Jahre beträgt, wird die fachliche Notwendigkeit einer Überarbeitung gesehen. Zudem stellt sich die Frage, ob die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit noch vergleichbar mit der Situation bei Erstfassung des Arbeitsblattes sind. Hierzu wurde im Rahmen einer DVGW-Studie mit der Arbeitsbezeichnung „Ermittlung von wissenschaftlichen Grundlagen für die Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 (GÜ W216)“ die wissenschaftlichen Grundlagen für die Überarbeitung des Arbeitsblattes ermittelt.

Das DVGW-Forschungsvorhaben wurde durch das TZW: DVGW Technologiezentrum Wasser gemeinsam mit dem IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH, Mülheim an der Ruhr durchgeführt. Die Erkenntnisse aus dem Vorhaben fließen bereits in die aktuelle Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 ein.

Die Studie wurde vom Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) finanziert.

Karlsruhe, im Juni 2021

Dr. J. Klinger

**Ermittlung von wissenschaftlichen Grundlagen für
die Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216
(GÜ W216)**

Abschlussbericht

Februar 2021

DVGW-Förderkennzeichen W 201903

Zusammenfassung

Als Grundlage für eine Entscheidung über die Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 „Versorgung mit unterschiedlichen Trinkwässern“ wurde im Rahmen des vorliegenden DVGW-Forschungsvorhabens durch umfängliche Literaturrecherchen sowie gezielte Befragungen von Wasserversorgern geprüft, ob in der derzeit vorliegenden Fassung von 2004 für die Bewertung vorgegebene Parameter gestrichen oder ggf. die zulässigen Schwankungsbreiten vergrößert werden könnten, ohne dass die Aussagekraft eingeschränkt wird. Ferner wurde der Frage nachgegangen, ob bei der Bewertung der Mischbarkeit von Trinkwässern weitere Parameter zu betrachten sind, deren Tragweite bisher nicht erkannt worden ist.

Die Bewertungsgrundlage des aktuellen Arbeitsblattes W 216 basiert auf dem wissenschaftlichen Kenntnisstand aus dem Zeitraum der 1980er und 1990er Jahre. Sie berücksichtigt gleichzeitig im Hinblick auf die Vorgängernormen den wissenschaftlichen Kenntnisstand seit ca. 1888 auf Basis der Verzahnung von Praxisuntersuchungen und Forschungsergebnissen. Das Spektrum der ausgewählten Parameter und die gewählten Bewertungsmaßstäbe decken vorzugsweise das Korrosionsverhalten von Guss- und Stahlrohren innerhalb des Verteilungsnetzes ab, sie sind in Nuancen aber auch für Kupfer und Kupferwerkstoffe in der Trinkwasser-Installation der Verbraucher anwendbar. Auswahl und Festlegung der Bewertungsmaßstäbe konnten aus der gesichteten Literatur weitestgehend nachvollzogen werden. An den Stellen, an denen auf Basis der zur Verfügung stehenden Informationen kein direkter Bezug möglich war, konnten aber zumindest die Gedankengänge, die zu den Festlegungen geführt hatten, nachgebildet werden.

Bei der Befragung von 100 ausgewählten Wasserversorgern wurde von keinen korrosionschemischen Auffälligkeiten bei der Mischung ihrer Trinkwässer berichtet. Die Vorgaben des DVGW-Arbeitsblattes W 216 scheinen sehr konservativ ausgelegt zu sein und werden weitestgehend befolgt.

Die in der aktuellen Fassung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 vorgegebenen Parameter zur Mischwasserbewertung stellen berechtigterweise die wesentlichen korrosionschemisch relevanten Messgrößen dar. Die Mischwasserbewertung anhand der Festlegung der zulässigen Schwankungsbreite hinsichtlich der Ausgangswässer ist für den Parameter $K_{s4,3}$ möglich, da die im Mischwasser zu erwartenden Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtsbedingungen hinreichend genau dargestellt bzw. vorausberechnet werden können.

Für die weiteren in der aktuellen Fassung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 vorgegebenen Parameter erscheint jedoch die Festlegung der Mischbarkeit anhand der wertegenau vorge-

gegebenen zulässigen Schwankungsbreite bei den Ausgangswässern fraglich. Durch die beispielsweise gegenseitige Beeinflussung der Einzelparameter werden Prognosen der korrosionschemischen Auswirkungen nach der Mischung entsprechend unscharf. Ferner spielen hierbei weitere systemrelevante Faktoren, wie beispielsweise eingesetzte Werkstoffe und die Netzbetriebsweise, eine mitentscheidende Rolle, die im Arbeitsblatt bisher nicht ausreichend berücksichtigt sind. Es bietet sich bei der Mischwasserbewertung auch an, konkret auf die Vorgaben der Trinkwasserverordnung und auf weitere bewährte korrosionschemische Vorgaben bspw. auf Normungen zuzugreifen.

Eine konzeptionelle Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 sollte nach dem Ergebnis des DVGW-Forschungsvorhabens somit angestrebt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Fragestellung und Zielsetzung	6
3	Ergebnis der Literaturrecherche - Entstehungsgeschichte der Arbeitsblätter W 601 und W 216	8
3.1	Allgemeines	8
3.2	Entsäuerung des Wassers und die Theorie der Kalk-Rost-Schutzschicht	10
3.2.1	Praxisbeobachtungen und Untersuchungen zur „rostschutzverhindernden Kohlensäure“ in Verbindung mit dem Sauerstoffgehalt des Wassers	10
3.2.2	Ansätze zur Bewertung des Einflusses ausgewählter Wasserparameter auf die Schutzschichtbildung bei Guss- und Stahlrohren	11
3.2.2.1	Tillmans - Kalk-Rostschutz-Theorie	12
3.2.2.2	Langelier-Sättigungs-Index LSI, Ryznar-Stabilitäts-Index RSI und McCauley driving force index DFI	13
3.2.2.3	Larson-Skold-Index	15
3.2.2.4	Das Siderit-Modell	16
3.2.2.5	Die Instationäre Korrosion	16
3.2.3	Korrosionschemische Richtwerte der Wässer - nationale Festlegungen	17
3.3	Historische Entwicklung des Arbeitsblattes W 216 - das Arbeitsblatt W 601	23
3.4	Das DVGW Arbeitsblatt W 601	27
3.5	Das Arbeitsblatt W 216, Ausgabe 1983 - Überarbeitung des W 601	33
4	Das Arbeitsblatt W 216	37
4.1	Ergebnisse der Recherchen	40
4.1.1	Praxisrelevanz des W 216	40
4.2	W 216 - Bewertungsparameter	44
4.2.1	Chlorid, Sulfat	45
4.2.2	Nitrat	49

4.2.3	Anionenquotient.....	49
4.2.4	Sauerstoff.....	50
4.2.5	Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht.....	53
4.2.6	TOC.....	58
4.2.7	Phosphat.....	60
5	Schlussfolgerung.....	63
6	Empfehlungen.....	65
6.1	Grundlegendes.....	65
6.1.1	Säurekapazität.....	65
6.1.2	Sulfat, Chlorid, Anionenquotient.....	66
6.1.3	Sauerstoff.....	68
6.1.4	TOC.....	68
6.1.5	Phosphat.....	69
6.2	Zusätzliche Ergänzungen.....	69
7	Literaturverzeichnis.....	71
8	Abbildungsverzeichnis.....	81
9	Tabellenverzeichnis.....	85
10	Anlagen.....	87
10.1	Fragebogen - Umfrage.....	87
10.2	Umfrageübersicht.....	90
10.3	Projektinformation.....	91

1 Einleitung

Zur Sicherung der Trinkwasserversorgung (inkl. der Notwasserversorgung) und der Bereitstellung einer ausreichenden Menge von Trinkwasser ist es häufig erforderlich, Wässer aus unterschiedlichen Gewinnungsanlagen zu nutzen. Besonders bei der Mischung von Oberflächen-, Quell- und Grundwässern - je nach geologischem und biologischem Ursprung - können sich diese, insbesondere innerhalb eines größeren Gewinnungsgebietes, sehr stark in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Auch jahreszeitlich bedingte Schwankungen können dazu führen, dass die Wasserzusammensetzung in einem Versorgungsgebiet deutlich unterschiedlich ist. Zum anderen ist es bei nicht ausreichendem örtlichem Wasserdargebot oft notwendig, über eine Fernversorgung Wässer über eine größere Distanz zu transportieren, um sie dann mit dem lokalen Trinkwasser der jeweiligen Abnehmer zu mischen.

In den letzten Jahren kommt es in Deutschland als Folge eines zu beobachtenden Klimawandels immer häufiger zu längeren Trockenzeiten mit teilweise erheblichen Niederschlagsdefiziten, die direkte Auswirkungen auf die örtliche Trinkwasserversorgung haben. So stellen ein zeitweise hoher Wasserbedarf und die durch fehlende Niederschläge knappen Ressourcen die komplexen Wasserversorgungssysteme vor große Herausforderungen. Insbesondere das Trockenjahr 2018 war für die Wasserversorgung in Deutschland ein entsprechender Stress-test. Der klimabedingten Verknappung der verfügbaren Wasserressourcen stand ein besonders hoher Wasserbedarf von Bevölkerung, Gewerbe/Industrie und Landwirtschaft gegenüber. Bei dieser Entwicklung stellt sich insbesondere die Frage nach den notwendigen Systemreserven (deutlich stärkere Beanspruchung der Wasserressourcen) und den Redundanzen der Versorgungssysteme. Es ist davon auszugehen, dass Extremereignisse zukünftig eher die Regel als die Ausnahme sein werden [1]; [2]; [3].

Auswertungen der zur Verfügung stehenden Daten, z.B. durch den Deutschen Wetterdienst DWD 2018, lassen erkennen, dass regional sehr unterschiedliche Bedingungen auftreten, die insbesondere Trockenperioden und teilweise seit Jahren zunehmend geringe Grundwasserneubildungsraten anbelangen [1]. Die Gewährleistung der Wasserversorgung unter Extrembedingungen verlangt daher angepasste Konzepte, in denen z.B. durch die Schaffung von Verbundstrukturen (flexibles Kombinieren verschiedener Rohwasser- und Gewinnungsarten), die die Erschließung zusätzlicher eigener Rohwasserquellen, Vernetzung mit benachbarten Wasserversorgern, Anschluss an Fernwasserversorgungssysteme beinhalten können, Engpässen (z.B. Bedarfsdeckung bei der Spitzenabgabe) entgegengewirkt werden kann [3].

Eine Vernetzung, ein Fremdbezug oder eine Erschließung neuer Rohwasserquellen ist aber auch immer mit einer unterschiedlich starken Veränderung der Wasserbeschaffenheit bzw. mit

der Mischung von Wässern verbunden. Konzeptionell wird die Mischung von zwei oder mehreren Wässern durch das DVGW-Arbeitsblatt W 216 geregelt, wobei Hinweise und Vorgaben (Bewertungsmaßstäbe zur Wasserchemie, technische Maßnahmen) zur Vermeidung von Korrosions- und Qualitätsproblemen gegeben sind [4]. Zu berücksichtigen sind korrosionschemische Auswirkungen durch die Mischung von Wässern insbesondere bei alten Versorgungsstrukturen mit einem relevanten Anteil von eisengebundenen Rohrleitungswerkstoffen, die keinen inneren Korrosionsschutz (d.h. ohne Zementmörtelauskleidung) aufweisen.

Vor diesem Hintergrund ist die Blickrichtung in die Historie der Wasserversorgung interessant, die bei der Ausarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 eine wesentliche Rolle gespielt und deren Inhalte geprägt hat.

Der historische Rückblick zeigt, dass in Deutschland im Zuge der Industrialisierung innerhalb des 19. Jahrhunderts bevölkerungsreiche Städte entstanden, die die Errichtung einer zentralen städtischen Wasserversorgung erforderten. Die bis dahin übliche Form der Brunnenbewirtschaftung (Schöpf-, Zieh- oder Pumpbrunnen¹) und – bei günstigen hydrogeologischen und topographischen Bedingungen – Rohrwasserversorgung mit Holzleitungen wurde damit abgelöst. In einigen Städten resultierten hierbei Verästelungsnetze unterschiedlicher Bauart, über die über höher gelegene Wasserbehälter die Wasserversorgung realisiert wurde. Die Bewirtschaftung der Wasserbehälter wurde dabei über unterschiedliche Wasserkünste geregelt, um ein Heben des Wassers in die Wasserbehälter zu ermöglichen² [5]; [6].

Im Jahr 1848 erhielten die Städte Hamburg (Abbildung 1.1), später 1856 Berlin und 1859 Magdeburg eine zentrale Wasserversorgung. Die meisten anderen Städte folgten diesbezüglich in den 1860er und 1870er Jahren. Eine Übersicht als Beispiel über den Ausbau der Wasserversorgung in Städten mit mehr als 5000 Einwohnern, sowie über die Verwendung der Rohrleitungsmaterialien, zeigen die im Jahr 1883 im Auftrag des DVGW erstellten Karten in Abbildung [7].

¹ Nutzbrunnen bestimmten die Wasserversorgung in den mittelalterlichen Städten bis weit in das 19. Jahrhundert. Der Prozess des Übergangs der Verwaltung der Brunnen von den Brunnengenossenschaften auf die Städte in den 20er und 30er Jahren des 19. Jahrhunderts lief zeitlich und räumlich sehr unterschiedlich [5].

² In einigen Städten gab es schon seit dem 18. Jahrhundert eine zentrale Wasserversorgung für besser gestellte Bürger. So wurde in Karlsruhe bereits etwa 1764 ein Wasserwerk in Betrieb genommen; Grundwasser wurde über einen Brunnen in einem darüber befindlichen Turm gepumpt und zunächst über eine hölzerne, ab 1776 in eine eiserne Leitung gespeist. Diese versorgte die Hofbeamten mit fließendem Wasser.



Abbildung 1.1: Hamburger Wassernetz 1848; die Zeichnungen stammen vermutlich von William Lindley

Voraussetzung einer zentralen Wasserversorgung waren zur Förderung des Wassers zeitlich und technisch aufwendige Dampfmaschinen (u.a. mit Kolbenpumpen) und es wurden Rohrmaterialien eingesetzt, welche für höhere Druckverhältnisse geeignet waren, um eine Verteilung des Wassers zu den Verbrauchern, in höhere Stadtteile und auch in höhere Gebäudegeschosse zu ermöglichen. Ab Mitte des 19. Jahrhunderts wurden in Deutschland Gussrohre für die Wasserverteilung eingesetzt³. Eine industrielle Fertigung erfolgte ab ca. 1885, die Normung bereits ab 1882 [6]. Die 104. BGW-Wasserstatistik weist für 1991/1992 für das Rohrnetz in Deutschland (Alte Bundesländer, inkl. Ostberlin) noch einen Anteil an Gussrohren von ca. 52 % an verlegten Rohrwerkstoffen aus [8], in Statistiken von 2016 liegt der Anteil immer noch bei ca. 20 % des Rohrnetzes [9].

Eine Begleiterscheinung des steigenden Trinkwasserbedarfs (Bevölkerung, Industrie) war insbesondere um die Wende des 19./20. Jahrhunderts die Erschließung großer, teils von den Versorgungsgebieten – Ballungsräume, hoch industrialisierte Gebiete – weit entfernter Wasservorkommen. Als klassische *Fernleitungen* aus diesem Zeitraum zur Versorgung großer Städte seien an dieser Stelle die Versorgung von Frankfurt aus dem Vogelsberg und Spessart (1879, 1911), von Nürnberg aus dem Rannagebiet (1908) und München aus dem Mangfallgebiet (1902, 1910) genannt [10]; [11]; [5]; [12]. Für Trinkwasserfernleitungen wurden bevorzugt großkalibrige Druckrohre aus Grauguss eingesetzt^{4,5}, z.B. wurde die Rannaleitung nach Nürnberg aus Graugussrohren DN 900 und DN 1000 erstellt [10].

Neben den Fernleitungen zur hauptsächlichen Versorgung von größeren Städten und deren Umfeld entstanden *Fernwasserversorgungen*, um im Wesentlichen städteübergreifend eine

³ 1850 bis 1885 Herstellung von Grauguss GGL I (Lamellengraphit), liegend in Sandform gegossen; 1885 bis 1926 GGL II (Lamellengraphit), stehend in Sandform gegossen [6]

⁴ Rohre aus Stahl werden seit Ende des 19. Jahrhunderts industriell hergestellt.

⁵ Grauguss ist der älteste Rohrwerkstoff im Wasserleitungsbau der letzten 200 Jahre. Er wurde vom duktilen Gusseisen verdrängt, das in Europa seit 1951 und in der Bundesrepublik Deutschland seit 1956 hergestellt wird.

Verknüpfung und Vernetzung von Wassermangel- und Wasserüberschussgebieten zu erzielen und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Hierzu gehören z.B. die Versorgung des Landkreises Aachen aus Talsperren der Eifel (1909), die Versorgung des württembergischen Landesteils von Baden-Württemberg durch die Landeswasserversorgung aus dem Donaugebiet (1912, 1935)⁶ und die Versorgung von Bremen aus dem Harz (1934) [10]; [13].

Nach dem Zweiten Weltkrieg herrschte in vielen Gemeinden Baden-Württembergs Wassernot. Dies galt insbesondere für die Jahre 1947 und 1949, in denen es nur wenig regnete. Hinzu kam das in den 1950er Jahren beginnende „Wirtschaftswunder“, das den Wasserbedarf sehr schnell anwachsen ließ. Das Thema des Wassermangels – z. B. auf der Schwäbischen Alb – führte z.B. Mitte des 20. Jahrhunderts zur Gründung der Bodenseewasserversorgung (BWV), die heute mehr als 300 Städte und Gemeinden mit relativ weichem Trinkwasser (8 - 9 °dH) versorgt.

Die Problematik der Unterschiedlichkeit von Wässern als Folge von Qualitätseinbußen bei Transport des Wassers durch das Verteilungsnetz zum Verbraucher wurde schon früh, d.h. Ende des 19. bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts erkannt. Die Probleme der Trinkwasserqualität betrafen vor allem Rostwasserbildung, Trübungserscheinungen und Geschmackseinbußen des Wassers sowie zu hohe Bleikonzentrationen im Trinkwasser der Trinkwasser-Installation. Die Probleme wurden die auf die Verteilung von sauren, calcitlösenden Wässern⁷ und die Mischung von Wässern zurückgeführt. Bereits in den 1880er Jahren wurde begonnen, diesen Qualitätseinbußen gegen zu steuern

Dies zeigt auch die große Anzahl von Veröffentlichungen zu diesem Thema im Journal für Gasbeleuchtung und Verwandte Beleuchtungsarten sowie für Wasserversorgung (Organ des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern) bzw. ab 1921 in der gwf Wasser/Abwasser (Nachfolgezeitschrift).

Die Frage des Einflusses der calcitlösenden Eigenschaften eines Trinkwassers auf die Rostwasserbildung und Trübung beim Transport und bei der Verteilung der Wässer durch Graugussrohre wurde aufgegriffen (Praxisuntersuchungen und Versuche im halbertechnischen Maßstab). Hierzu sei auf die Bleiproblematik in Dessau 1886 (Bleivergiftung durch Trinkwasser, d.h. Trinkwasser-Installation und Hausanschlussleitungen⁸) und die Arbeiten von Heyer [14] zur Entsäuerung des Wassers verwiesen.

⁶ Die Landeswasserversorgung LW wurde 1912 gegründet, die Anlagen gingen 1917 in Betrieb, kommunaler Zweckverband, 106 Verbandsmitglieder.

⁷ Die calcitlösenden Eigenschaften der Wässer können entweder auf der fehlenden Wasseraufbereitung (Entsäuerung) oder auf der Mischung von Wässern beruhen.

⁸ Weitere Bleivergiftungen Ende des 19. Jahrhunderts: Calau 1888, Diepholz und Umgebung 1886 – 1905, Emden 1897, Offenburg a.M. 1884 Varel bis 1887, Wilhelmshaven 1886 [81]

Das DVGW-Arbeitsblatt

Das DVGW-Arbeitsblatt W 216 „Versorgung mit unterschiedlichen Trinkwässern“ wurde im Juni 1983 [15] als Überarbeitung des DVGW Arbeitsblattes W 601 [16] veröffentlicht. Die aktuelle Version stammt aus dem Jahr 2004 [4]. In dem Arbeitsblatt werden die Kriterien für die Bewertung der Unterschiedlichkeit der Beschaffenheit von Trinkwässern sowie geeignete technische Maßnahmen für die Fälle aufgezeigt, bei denen Trinkwässer mit unterschiedlicher Beschaffenheit vorliegen, um eventuelle Nachteile der Mischung solcher Wässer für die Wasserversorgungsanlagen sowie für die Abnehmer zu vermeiden.

Die unterschiedlichen Ausgaben des Arbeitsblattes fußen als technische Regel, die den Stand der allgemein anerkannten Regeln der Technik beinhaltet, bei den dargestellten Inhalten und festgelegten Bewertungsmaßstäben jeweils auf dem – in diesem Zeitraum – aktuellen Forschungsstand zur Bewertung der korrosionschemischen und mikrobiologischen Eigenschaften der zur Verteilung verwendeten Trinkwässer.

Aufgrund des Alters des Arbeitsblattes (mittlerweile 16 Jahre) wird die fachliche Notwendigkeit einer Überarbeitung gesehen, zumal sich die Frage stellt, ob die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit noch vergleichbar mit der Situation bei Abfassung des Arbeitsblattes sind. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens, das durch TZW und IWW durchgeführt wird, sollen die wissenschaftlichen Grundlagen für die Überarbeitung des Arbeitsblattes erarbeitet werden.

2 Fragestellung und Zielsetzung

Das DVGW-Arbeitsblatt W 216 in seiner derzeitigen Fassung macht Vorgaben, wie die gleiche und gleichmäßige Beschaffenheit von Trinkwässern geprüft und bewertet werden kann. Hierzu werden sieben Parameter (Chlorid, TOC, Phosphat, Säurekapazität bis pH 4,3 ($K_{S4,3}$), Sauerstoff, Sulfat und ein Anionenquotient aus den Parametern Chlorid, Sulfat und Säurekapazität ($K_{S4,3}$)) herangezogen. Für jeden dieser Parameter ist ein Bewertungsmaß vorgegeben.

Anhand des Bewertungsmaßes kann unter Heranziehung der Ergebnisse von aktuellen Trinkwasseranalysen beurteilt werden, ob ein Wasser von gleichmäßiger Beschaffenheit ist (z.B. jahreszeitliche Änderungen, Grundwässer unterschiedlicher Brunnenfassungen) und ob zwei Wässer von gleicher oder unterschiedlicher Beschaffenheit vorliegen (geologischer Ursprung, Mischung von Grund- und Oberflächenwasser). Die Ergebnisse dieser Bewertung sind die Grundlage für die Einstufung von zwei oder mehreren Wässern als "mischbar" im Sinne der allgemein anerkannten Regeln der Technik. Werden die Bewertungsvorgaben eingehalten, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Beschaffenheit des Mischwassers selbst oder die der Rohrleitungen nicht – verursacht durch die Mischung – nachteilig verändert, z. B. durch eine Veränderung der korrosionschemischen Eigenschaften oder der mikrobiologischen Stabilität.

Es ist aus heutiger Sicht allerdings nicht mehr ohne weiteres nachvollziehbar, auf welcher Grundlage die Liste der für die Bewertung herangezogenen Parameter erstellt worden ist. Dies führt bei der Anwendung in der Praxis häufiger zu Diskussionen über die Aktualität und Anwendbarkeit der ursprünglichen Auswahl der Parameter. Auch die wissenschaftliche Basis für die Bewertungsmaße lässt sich aus heutiger Sicht nicht direkt erkennen.

In dem Forschungsvorhaben soll daher auf wissenschaftlicher Basis sowohl die Herleitung bzw. die Auswahl der Parameter nachvollzogen, als auch gleichzeitig überprüft werden, ob einzelne Parameter gestrichen oder ggf. deren zulässige Bandbreiten vergrößert werden könnten, ohne dass die Aussagekraft eingeschränkt wird. Ferner soll der Frage nachgegangen werden, ob weitere Parameter zu betrachten und in die Bewertung mit einzubeziehen sind, deren Tragweite bisher nicht erkannt worden ist.

Die Erkenntnisse aus dem Vorhaben können als Grundlage für eine Entscheidung über die Notwendigkeit der Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblatts W 216 herangezogen werden. Falls eine Überarbeitung als notwendig erachtet wird, können die Ergebnisse des Vorhabens auch als wissenschaftliche Basis der überarbeiteten Fassung genutzt werden.

Das Forschungsvorhaben basiert auf drei wesentlichen Bestandteilen:

-
- Abfrage von Praxiserfahrungen bei Versorgern, in deren Verteilungsnetzen verschiedene Trinkwässer gemischt werden (insbesondere bei Fernwasserversorgern bzw. den von ihnen versorgten Unternehmen, die mit Trinkwasser aus eigener Gewinnung mischen). Die Befragung soll dabei in Form einer Fragebogenaktion erfolgen. Hier sollen ausgewählte Wasserversorger in Einzelinterviews vertiefend befragt werden. Die Ergebnisse der Befragung werden in einer Datenbank zusammengestellt.
 - Es sollen Informationen zur Historie der Auswahl der Parameter von Personen eingeholt werden, die an der Erarbeitung und Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 (bzw. W 601) beteiligt waren. Ergänzend sollen – falls noch vorhanden – aus dem DVGW-Archiv die entsprechenden Sitzungsprotokolle beschafft und ausgewertet werden.
 - Es werden intensive Recherchen in der „historischen“ und aktuellen internationalen Literatur zu den wissenschaftlichen Grundlagen durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf der nationalen Literatur liegt. Die Ergebnisse werden zur Bewertung und fachlichen Einschätzung des Einflusses der Bandbreite der in W 216 angegebenen Parameterwerte auf Korrosionserscheinungen wissenschaftlich ausgearbeitet und für eine Überarbeitung des Arbeitsblattes vorgestellt.

3 Ergebnis der Literaturrecherche – Entstehungsgeschichte der Arbeitsblätter W 601 und W 216

3.1 Allgemeines

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die einschlägige nationale als auch internationale Literatur für einen Zeitraum von 1886 bis 2020 gesichtet und auf ihre Relevanz ausgewertet. Die unterschiedlichen Betrachtungszeiträume ergeben sich hierbei aus dem jeweiligen Veröffentlichungsjahr der Arbeitsblätter

- W 601, Ausgabe 1976 – Zeitraum 1886 bis 1969
- W 216, Ausgabe 1983 – Zeitraum 1970 bis ca. 1983
- W 216, Überarbeitung und Ausgabe 2004 – Zeitraum 1984 bis 2001
- Aktuelle Themen – Zeitraum 2004 - 2020

Die Literatur des Zeitraums von ca. sechs Jahrzehnten – von 1886 bis 1969 – kann thematisch als Wissensgrundlage für die Erarbeitung des Arbeitsblattes W 601 angesehen werden. Die Veröffentlichungen aus diesem Zeitraum zeigen im Wesentlichen fünf wasserchemische Haupt-Themenkreise, die den Aspekt der Nutzung von Wässern unterschiedlicher Herkunft betreffen:

- Korrosionsverhalten von Gussrohren, d.h. Wechselwirkung Trinkwasser/Werkstoff, und Betonung der Notwendigkeit der Einstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes zur Schutzschichtbildung bei eisengebundenen Rohrwerkstoffen (Theorie der „Kalk-Rost-Schutzschicht“ bei Guss- und Stahlrohren, ausgehend von Tillmans 1912)
- Nutzung von Wässern unterschiedlicher Herkunft und deren Mischung zur Deckung und Sicherung des Trinkwasserbedarfs
- Fernwasserversorgung
- Trinkwasserversorgung aus dem Rhein (inkl. Uferfiltrat) und die Problematik der Chlorid-Belastung (deutsche und niederländische Erfahrungen)
- Mikrobiologische Beeinträchtigung der Trinkwasserqualität bei der Mischung von Oberflächen – und Grundwässern

Die Schwerpunktbildung der Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Guss- und Stahlrohren ohne inneren Korrosionsschutz, schmelztauchverzinkten Eisenwerkstoffen für die

Trinkwasser-Installation und als Hausanschlussleitungen und die daraus resultierenden Qualitätsveränderungen des Trinkwassers durch Trübung, Färbung, Rostwasser, Partikelbildung (Zinkgeriesel) war zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des W 601 der Tatsache geschuldet, dass eisengebundene Werkstoffe – wie bereits dargestellt – den Hauptteil des Trinkwassernetzes (Transport- und Verteilungsleitungen) und der Trinkwasser-Installation ausmachten. Die auftretenden Probleme, die in der Literatur beschrieben wurden, waren korrosionsseitig im Wesentlichen Rostwasserprobleme und Trübung des Wassers im Netz der öffentlichen Wasserversorgung.

Für die Trinkwasser-Installation wurden in dem betrachteten Zeitraum neben Blei vorzugsweise verzinkte Stahlrohre verwendet, für die diese Untersuchungsergebnisse gleichsam angewendet werden können. Ein verstärkter Einsatz von Kupferrohren für die Trinkwasser-Installation erfolgte regional erst in den 1960er Jahren, nachdem die Verbrauchereinschränkungen für den Einsatz von Kupferrohren in der Kriegs- und Nachkriegszeit bis 1954 aufgehoben worden waren. Die Untersuchungen zum Korrosionsverhalten von Kupferrohren betrafen ab 1960 im Wesentlichen Mechanismen der Lochkorrosion insbesondere im Kaltwasserbereich. Angaben zum Korrosionsverhalten von Kupfer im Warmwasserbereich stammen im Wesentlichen aus den skandinavischen Ländern in Verbindung mit der Verteilung weicher, saurer Wasser, oft Eigenwasserversorgungen [17]; [18], in aktuelleren Veröffentlichungen im Wesentlichen aus Australien [19]. Untersuchungen zur Frage der Kupferlöslichkeit – vorzugsweise in Versuchsanlagen – und der damit verbundenen Abgabe von Kupfer an das Trinkwasser, kamen in den Fokus der Forschung in Verbindung mit der Einhaltung des Richtwertes für Kupfer im Rahmen der Trinkwasserverordnung 1990 [20]; [21].

Aus dem Blickwinkel des Werkstoffverhaltens gehen die Überarbeitung des W 601 und Veröffentlichung des W 216 im Jahr 1983 einher mit einer Änderung der Anschauungsweise zur Schutzschichtbildung bei Guss- und Stahlrohren, vorzugsweise in Deutschland. Grundlage sind die Arbeiten von Kölle/Sontheimer zum Siderit-Modell (1977) [22]; [23], die Arbeiten von Kuch zur instationären Korrosion (1984), die insbesondere die Betriebsbedingungen (Stagnation) in den Fokus stellen [24], [25] sowie die Ergebnisse des FE-KKs Forschungs- und Entwicklungsprogramms „Korrosion und Korrosionsschutz“ des BMFT von 1974 bis 1993 zum Themenkomplex der Korrosion in Wasserverteilungssystemen [26].

Aus dem Blickwinkel der Wasserchemie sind die Untersuchungen und grundlegenden Arbeiten insbesondere von Tillmans zur Einstellung der Calcitsättigung des Trinkwassers als Voraussetzung zur Behebung von Rostwasserproblemen ab ca. 1912 zu betrachten [27]; [28]; [29]. Die Untersuchungen von Tillmans zur Frage der unter korrosionschemischen Gesichtspunkten notwendigen bzw. sinnvollen Entsäuerung eines Trinkwassers basierten u.a. auf den

Arbeiten von Heyer, der die Bleiprobleme im Dessauer Trinkwasser bei Einsatz von Trinkwasser-Installationen aus neuen Bleirohren und in Hausanschlussleitungen in Kontakt mit einem weichen, sauren Wasser durch eine Marmorfiltration des Wassers lösen konnte [14].

Bei den folgenden Ausführungen wird entsprechend der Aufgabenstellung der Schwerpunkt der Bearbeitung auf die Korrosionschemie der Mischwässer, d.h. die Wechselwirkung von Werkstoffen und Mischwasser, und die mikrobiologischen Auswirkungen der Verteilung von Wässern unterschiedlicher Zusammensetzung gelegt. Die ebenfalls im W 216 enthaltenen Angaben zur technischen Umsetzung, z.B. Zonentrennung, sind nicht Gegenstand des Berichtes.

3.2 Entsäuerung des Wassers und die Theorie der Kalk-Rost-Schutzschicht

Die Vermeidung von Rostwasserproblemen, die häufig auch mit Geschmacksbeeinträchtigungen verbunden waren, kam ca. ab dem Jahr 1890 in den Fokus der Untersuchungen. Schwerpunktthemen waren der Einfluss calcitlösender Wässer und die Theorie der rostschutzverhindernden Kohlensäure, die im Wesentlichen durch die Untersuchungen von Tillmans angestoßen wurden. Gleichzeitig stand aber auch der Einfluss des Sauerstoffgehaltes auf das Korrosionsverhalten und die Deckschichtbildung von un- und niedriglegierten Eisenwerkstoffen im Fokus der Untersuchungen.

Problemlösungsansätze wurden zusätzlich durch eingehende Praxisuntersuchungen im Rohrnetz validiert. Als Beispiel seien in diesem Zusammenhang die Untersuchungen von Scheelhaase zur Verteilung des Stadtwaldwassers in Frankfurt am Main angeführt, die ca. 1889 begonnen haben und deren Ergebnisse 1909 veröffentlicht wurden. Aufgrund ihrer Bedeutung und Breitenwirkung werden sie im Folgenden näher betrachtet [30].

3.2.1 Praxisbeobachtungen und Untersuchungen zur „rostschutzverhindernden Kohlensäure“ in Verbindung mit dem Sauerstoffgehalt des Wassers

Scheelhaase berichtete 1909 über Rostwasserprobleme und das Auftreten massiver Korrosionsschäden nach Inbetriebnahme der Grundwasserwerke im Stadtwald in Frankfurt a. Main. Insbesondere nach Sonn- und Feiertagen, an welchen die Leitungen weniger beansprucht waren, häuften sich jeweils Anfang der Woche die Kundenbeschwerden über rostiges, metallisch schmeckendes Wasser. Die Probleme wurden nur bei Verteilung des Stadtwaldwassers, nicht bei der Verteilung des Quellwassers aus dem Vogelsberg und Spessart festgestellt. Als

zusätzliches Problem des Stadtwaldwassers traten 1901 signifikante Schäden an der Zementmörteloberfläche der Trinkwasserbehälter kurz nach der Inbetriebnahme der Behälter auf [30].

Systematische Untersuchungen und die Gegenüberstellung der Wasseranalysen kamen zu dem Ergebnis, dass das Grundwasser einen Gehalt an freier Kohlensäure von 30 mg/l CO₂ aufwies. Als Problemlösung erwies sich die Entsäuerung des Wassers mittels einer Kombination aus Verrieselung und Marmorfiltration⁹.

Die Veröffentlichungen von Scheelhaase führten im Nachgang zu einer größeren Anzahl von Rückmeldungen von Wasserversorgern mit vergleichbarer Problematik, bei denen der Betrieb von Enteisungsanlagen zur Verhinderung von Rostwasserbildung keine Wirkung gezeigt hatten, da die Probleme nicht bei der Wasseraufbereitung, sondern erst im Rohrnetz auftraten (Wiedervereisung) [30]; [31]; [32]. Evans berichtet ebenfalls über die Maßnahmen in einer größeren Anzahl amerikanischer Städte, in denen die calcitlösenden Wässer vor der Verteilung entsäuert wurden [33].

Praxiserfahrungen aus dieser Zeit zeigen, dass bei Verteilung von sauerstofffreien Wässern in Kontakt mit Gussrohren Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigungen auftraten [34]. Die Wässer neigten bei Luftkontakt zur Trübung (Ausflockung von Eisen) [30]; [34]. Die Untersuchungen von Scheelhaase führten zu der Erkenntnis, dass bei sauerstofffreien Wässern die Eisenlöslichkeit ohne Bildung einer Eisendeckschicht überwiegt. Ähnliche Beobachtungen zum Verhalten sauerstofffreier Wässer wurden ebenfalls von Klut [35] und Tillmans gemacht [28].

Es wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass bei sauerstoffhaltigen Wässern die Anwesenheit des Anteils an überschüssiger, nicht gebundener Kohlensäure zu einer Kombination von Eisenlösung und Eisenabscheidung auf der Werkstoffoberfläche, also zum eigentlichen Vorgang der Bildung von Eisendeckschichten, führt. Tillmans war der Auffassung, dass für den Angriff auf Eisen die gesamte Überschusskohlensäure als rostschutzverhindernde Kohlensäure verantwortlich sei [30]; [28].

3.2.2 Ansätze zur Bewertung des Einflusses ausgewählter Wasserparameter auf die Schutzschichtbildung bei Guss- und Stahlrohren

Die grundlegenden Arbeiten von Tillmans zum Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht und der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen gebundener und freier Kohlensäure und der daraus

⁹ In dem Artikel von 1909 ist eine ausführliche Beschreibung des Entsäuerungsverfahrens und die Unterschiede zum Verfahren nach Heyer enthalten [30]

abgeleiteten Theorie der Kalk-Rost-Schutzschicht führten zu einer großen Anzahl von Arbeiten, insbesondere in Deutschland und den USA, die sich über einen Zeitraum von Jahrzehnten mit dem Themenkomplex des Gleichgewichtssystems der Kohlensäure und ihrer Ionen, der Berechnung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes und der Deckschichtbildung auf un- und niedriglegierten Eisenwerkstoffen beschäftigten.

Im Folgenden werden einige der Schwerpunktthemen, die zur Entwicklung weiterer Indizes zur Bewertung der Deckschichtbildung auf Eisenwerkstoffen geführt haben, kurz zusammengefasst. Hierbei stehen im Wesentlichen die unterschiedlichen Ansätze und daraus folgenden Bewertungen im Vordergrund.

3.2.2.1 Tillmans – Kalk-Rostschutz-Theorie

Die Arbeiten Tillmans befassen sich fast alle mit dem Thema der Calciumcarbonatsättigung des Wassers und den Methoden zur Bestimmung der für dieses Gleichgewicht notwendigen Größen.

Auf Tillmans geht die Theorie der Schutzschichtbildung durch Einlagerung und Verkittung der Eisenoxidschichten mittels ausgefälltem CaCO_3 zurück. Ausgangspunkt ist die Auffassung, dass es zu einer Schutzschichtbildung nur kommen kann, wenn das Wasser keine kalkaggressive Kohlensäure enthält, d.h. die Konzentration an freier Kohlensäure (CO_2) sollte im Gleichgewicht mit der Konzentration an gebundener Kohlensäure (HCO_3^-) sein; eine Randbedingung für die Schutzschichtbildung ist die Anwesenheit einer ausreichenden Menge an Sauerstoff. Der erforderliche Ausfall von Kalk wird durch die Wandalkalisierung an den kathodischen Stellen ausgelöst und tritt nicht ein, wenn das Wasser calcitlösend ist.

Die Kritik an der These der Kalk-Rost-Schutzschicht im weiteren Verlauf der Forschungen besteht darin, dass gut schützende Eisendeckschichten Calcitgehalte von maximal 5 % aufweisen und höhere Anteile eher zu weniger gut schützenden Deckschichten führen.

Auch von Tillmans wurde verstärkt darauf hingewiesen, dass die Einstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes eine wichtige Voraussetzung für eine Schutzschichtbildung darstellt, die tatsächliche Struktur und die Eigenschaften aber in der Praxis von einer Reihe von Zusatzfaktoren, wie dem Sauerstoffgehalt und der Fließgeschwindigkeit des Wassers, abhängig sind.

3.2.2.2 Langelier-Sättigungs-Index LSI, Ryznar-Stabilitäts-Index RSI und McCauley driving force index DFI

Der Langelier-Sättigungs-Index ist ein Indikator zur Einschätzung, ob wasserseitig Bedingungen vorliegen, die eine Abscheidung von Calciumcarbonat und damit eine Schutzschichtbildung auf Eisenwerkstoffen ermöglichen [36]. Im Gegensatz zum Langelier-Sättigungs-Index LSI weist der Ryznar-Stabilitäts-Index nur positive Werte auf. Je größer der Index ist, umso korrosiver wirkt das Wasser. Ein Indexwert von 6,5 bis 7,0 beschreibt dabei ein gesättigtes, also im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht stehendes Wasser. Zusätzlich zu dem Index erstellte Ryznar eine Kurve, die ermöglicht, auf Basis der aktuellen Wasserdaten und unter Berücksichtigung des RSI eine Abschätzung durchzuführen, ob eine Schutzschichtbildung, eine Ausbildung von Inkrustationen oder die Zunahme von Korrosionsprozessen zu erwarten ist [37].

Sowohl der Langelier- als auch der Ryznar-Index berechnen sich auf Basis des pH-Wertes bei der Bewertungstemperatur (Wassertemperatur bei der Probenahme) und dem pH-Wert der Calcitsättigung (unter Berücksichtigung von Leitfähigkeit, Säurekapazität, Calciumgehalt und Temperatur) nach folgenden Gleichungen

- Langelier-Index LSI

$$LSI = pH - pH_s$$

- Ryznar-Index

$$RSI = 2 (pH_s) - pH$$

Der McCauley driving force index beschreibt ebenfalls die Tendenz zur Abscheidung und Einlagerung von Calciumcarbonat in die Deckschicht, im Gegensatz zum LSI und RSI- geht er davon aus, dass auf Basis des Index der Grad der Abscheide- oder Lösetendenz berechnet werden kann [38]:

- McCauley driving force index

$$DFI = \frac{Ca^{2+} \times CO_3^{2-}}{K_{sp} \times 10^{10}}$$

Für die Bewertung der drei Indizes gelten folgende Kriterien (Tabelle 3.1):

Tabelle 3.1: Kennzahlen und Bewertung, LSI, RSI und DFI

Index	Kennzahl	Bewertung
LSI	< -0,5	zunehmende Korrosivität; das Wasser wirkt kalklösend
LSI	> 0,5	zunehmende Kalkabscheidung
RSI	<< 6	Zunahme der Deckschichtbildung
RSI	> 7	eingeschränkte Schutzschichtbildung
RSI	>> 8	Zunahme der Korrosivität
DFI	1	Calciumcarbonatgesättigtes Wasser; Tendenz zur Schutzschichtbildung
DFI	> 1	Calciumcarbonatübersättigtes Wasser; Tendenz zur Kalkabscheidung
DFI	< 1	Calcitlösendes Wasser

Eine Übersicht über zusätzliche, unterschiedliche Arten von Korrosions-Indizes ist in der Veröffentlichung von Singley aus 1981 enthalten [39]. Singley sieht die unreflektierte Anwendung der Indizes kritisch, da weitere Bedingungen, die die Deckschichtbildung und die Deckschichteigenschaften beeinflussen, nicht berücksichtigt werden. So z. B. die Fließintensität des Wassers (Geschwindigkeit, Stagnation), Einfluss von Phosphaten, Silikaten und anderer Wasserinhaltsstoffe, die in die Kristallstruktur von Calcium und die Abscheidetkinetik eingreifen, z.B. sehr hohe Magnesiumgehalte. Als großes Manko dieser Indizes sieht er die Notwendigkeit an, dass bei der Berechnung der Gleichgewichtszustände die Temperaturabhängigkeit (Wassertemperatur Sommer/Winter) und die unterschiedliche Ionenstärke berücksichtigt werden müssen, was in der Regel aber nicht erfolgt [39].

Auch aktuellere Arbeiten beschäftigen sich – vorzugsweise in den USA – weiterhin mit der Modifikation von Corrosion-Indices, z.B. der Modifikation des Larson-Skold-Index unter Berücksichtigung von Natrium, der Temperatur und eines hydraulischen Faktors, der aus der Modellierung des Versuchsanlagenbetriebs stammt [40].

3.2.2.3 Larson-Skold-Index

Der Larson-Skold-Index beschreibt den Einfluss der Neutralsalze auf das Korrosionsverhalten eisengebundener Werkstoffe unter Berücksichtigung der Pufferung des Wassers [41]. Zurückgeführt wurde der Einfluss auf die Veränderung der Leitfähigkeit des Wassers durch die Neutralsalze. Bei Anwesenheit von Neutralsalzen (Chlorid, Sulfat) können Korrosionselemente stabilisiert werden. Durch Überführung und Anreicherung von Chlorid an der Anode und der Bildung von Säure (Salzsäure) wird die Anode korrosionschemisch aktiviert und ggf. langfristig stabilisiert. Die Bildung alkalischer Reaktionsprodukte an der Kathode bewirkt eine Passivierung. Je nach Pufferung des Wassers kann der pH-Wert an der Werkstoffoberfläche mehr oder weniger konstant gehalten werden und bestimmt so das Ausmaß der Korrosionsintensität.

Der Larson-Skold-Index ist die Basis für die Übernahme des Anionenquotienten S_1 in die DIN 50930:

- Larson-Skold-Index

$$\frac{c(Cl^-) + 2 c(SO_4^{2-})}{K_{S4.3}}$$

Für die Bewertung des Index gelten folgende Kriterien (Tabelle 3.2):

Tabelle 3.2: Kennzahlen und Bewertung, Larson-Skold

Index	Kennzahl	Bewertung
Larson-Skold	<< 0,8	kein negativer Einfluss der Neutralsalze
	0,8 bis << 1,2	Anstieg der Korrosionsraten
	>> 1,2	Anstieg der Korrosionsraten und Lokalkorrosion

3.2.2.4 Das Siderit-Modell

Das Siderit-Modell zur Deckschichtbildung bei Eisenwerkstoffen wurde durch Sontheimer und Kölle propagiert [25]. Auf Basis von Untersuchungen an gealterten Deckschichten aus dem praktischen Betrieb der Rohre im Rohrnetz gingen sie davon aus, dass bei der Eisenkorrosion nicht nur Calciumcarbonat, sondern auch Eisencarbonat (Siderit) gebildet wird. Gut schützende Schichten sollten dann immer gebildet werden, wenn die Bildung von Goethit über die Zwischenstufe Siderit erfolgt und eine direkte Oxidation und Ausfällung von voluminösem Eisenoxidhydrat vermieden wird.

3.2.2.5 Die Instationäre Korrosion

Ausgangspunkt für die Theorie der instationären Korrosion von Kuch war die Beobachtung, dass sich Korrosionsprobleme in Wasserverteilungsnetzen in der Mehrzahl der Fälle durch Rostwasser bemerkbar machen [24]. Das Modell geht davon aus, dass die Schutzwirkung einer Deckschicht nicht nur durch ihre diffusionsrelevanten Eigenschaften und Transportprozesse bestimmt wird, sondern auch von der elektrochemischen Reduzierbarkeit der Korrosionsprodukte abhängt. Eine Reduktion von Korrosionsprodukten kann unter Stagnationsbedingungen des Wassers stattfinden, da diese nicht nur mit einer Sauerstoffzehrung im Bulkwasser, sondern auch mit einer Sauerstoffverarmung innerhalb der Deckschicht verbunden sein kann.

Unter der bei Stagnations-Bedingungen eintretenden instationären Korrosion können Bestandteile der Deckschicht reduziert werden und halten die Umsetzung des metallischen Eisens – also den Korrosionsvorgang – aufrecht. Bei erneutem Fließen des Wassers wird die Deckschicht wieder mit Sauerstoff versorgt. Es findet eine Reoxidation der zuvor reduzierten Bestandteile statt. Der Prozess kann sich beliebig oft wiederholen. Die so resultierenden Rostwasserprobleme sind somit in der Praxis in der Mehrzahl der Fälle an geringe Fließintensitäten (Endstrangbereiche; geringe Wasserentnahme) und längere Stagnationszeiten gekoppelt.

Fazit:

Tabelle 3.3 gibt zusammenfassend einen Überblick über die maßgeblichen Entwicklungsprozesse zum Thema der Deckschichtbildung auf Guss- und Stahlrohren. Wie die Aufstellung zumindest für den deutschsprachigen Raum zeigt, sind nach ca. 1990 keine grundlegenden

Forschungsprojekte zu den Korrosionsmechanismen mehr durchgeführt worden. Die nach diesem Zeitraum durchgeführten Untersuchungen betreffen im Wesentlichen Einzelfragen, deren Untersuchungsergebnisse aber aufgrund ihrer häufig speziellen und individuellen Rahmenbedingungen nur zum Teil zur Verallgemeinerung genutzt werden können.

Tabelle 3.3: Entwicklung der Forschung zum Thema Deckschichtbildung auf Gussrohren – Von der Kalk-Rostschutz-Theorie zur instationären Korrosion

Jahr	Autor	Thema	Anlass
1886	Heyer, C.	Filtration über Mamor	Bleilöslichkeit
1912	Tillmans, J.	Kalkaggressive Kohlensäure "Kalk-Rostschuttschicht"	Rostwasser
1936	Langelier, W.	Sättigungsindex	Rostwasser
1938	Koojmans, J.	Einfluss der Eisenverbindungen	Rostwasser
1956	Stumm, W.	Pufferungsintensität	Rostwasser
1958	Larson, T.	Neutralsalzeinfluss	Rostwasser
1958	McCauley, R.	Reine Calcit-Deckschichten	Rostwasser
1977	Kölle/Sontheimer, H.	Siderit-Modell	Rostwasser
1984	Kuch, A.	Instationäre Korrosion (NSSC)	Rostwasser

3.2.3 Korrosionschemische Richtwerte der Wässer – nationale Festlegungen

Zwischen 1956 und 1966 wurden Richtwerte veröffentlicht, die zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens un- und niedriglegierter Eisenwerkstoffe und verzinkter Eisenwerkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser angewendet werden konnten [42]; [43].

Als Ergebnis einer Gemeinschaftsarbeit des Korrosionsausschusses der FG Wasserchemie der GDCh & dem Deutschen AK der Internationalen Forschungs-Gesellschaft für Wasser und Abwasser – Arbeitsgebiet Wasser und Korrosion – wurden folgende Richtwerte für die Bewertung des Korrosionsverhaltens von un- und niedriglegierten Eisenwerkstoffen, verzinkten Eisenwerkstoffen, Kupfer und Kupferlegierungen auf Basis der chemischen Zusammensetzung von Wässern (kalt und warm) veröffentlicht:

- Das Wasser darf keine rostschutzverhindernde Kohlensäure enthalten
$$\text{CO}_2 \text{ rostschutzverh.} = \text{CO}_2 \text{ frei} - \text{CO}_2 \text{ zugeh.frei} \text{ (mg/L)}$$

Die zugehörige freie Kohlensäure wird aus der Tillmans'schen Formel berechnet
- Die Fließgeschwindigkeit soll normalerweise 0,5 m/s nicht unterschreiten
- Zur Schutzschichtbildung muss die Karbonathärte des Wassers erfahrungsgemäß mindestens 2 °dH betragen, bei langsam fließendem Wasser von < 0,5 m/s eine Karbonathärte > 6 °dH
- Chloridgehalt: Wässer mit niedriger Karbonathärte und geringer Geschwindigkeit nicht ≥ 75 mg/L
- Sulfatgehalt spielt keine Rolle bei metallenen Werkstoffen; bei ZM nicht > 300 mg/L
- Nitrat-/Nitritgehalt: bei verzinkten Werkstoffen ≤ 20 mg/L
- Ammoniumsalze: kupferfreie Werkstoffe ≤ 20 mg/L NH_4^+ ; bei Kupfer- und Kupferlegierungen sind keine Ammoniumsalze zulässig
- Abdampf- und Glührückstand: Werte werden ohne Karbonathärte angegeben, d.h. Abdampf- und Glührückstand müssen um diesen Wert verringert werden, Abdampfrückstand_{reduz.} bei 180° ≤ 600 mg/l, Glührückstand_{reduz.} ≤ 550 mg/l
- Sauerstoffgehalt: bei Strömungsgeschwindigkeiten < 0,5 m/s mindestens 6 mg/l O_2 ; bei zunehmender Geschwindigkeit ≥ 2 mg/l O_2

Es wurde davon ausgegangen, dass metallene Werkstoffe in Kontakt mit kalten Wässern (bis 25 °C), die die oben genannten Anforderungen erfüllen, zur Deckschichtbildung neigen und keiner besonderen Behandlung bedürfen [42].

Im Dezember 1960 wurde die DIN 50930 „Korrosion der Metalle zur Beurteilung des korrosionschemischen Verhaltens kalter Wässer gegenüber unverzinkten und verzinkten Eisenwerkstoffen“ als Vornorm veröffentlicht [43]. Die Norm berücksichtigte dabei die von Steinrath 1956 zusammengefassten Richtwerte [31]. Zweck der Norm war die qualitative Beurteilung der korrosionschemischen Eigenschaften kalter Wässer und eine Angabe der Voraussetzungen zur Schutzschichtbildung bei unverzinkten und verzinkten un- und niedriglegierten Eisenwerkstoffen.

Tabelle 3.4 zeigt einen Überblick über die Bewertungsmaßstäbe. Werden die Anhaltswerte eingehalten, so neigen die oben genannten Werkstoffe zur Schutzschichtbildung. Mit Veröffentlichung der Vornorm wurde der Aufruf gestartet, diese anzuwenden und die Erfahrungen und Anregungen dem Normenausschuss für die Berücksichtigung bei der Überarbeitung der Norm (ab 1964) zur Verfügung zu stellen. Ziel war es, zu überprüfen, ob die Voraussetzungen, die zur Erstellung der Vornorm geführt hatten, noch zutreffend waren.

Tabelle 3.4: Zusammensetzung und Eigenschaften des Wassers im Hinblick auf die Förderung der Schutzschichtbildung bei unverzinkten und verzinkten un- und niedriglegierten Eisenwerkstoffen [43]

		Anhaltswerte				Anhaltswerte	
Rostschutzverhindernde Kohlensäure CO ₂ rostschutzverf.		Nicht vorhanden		Kaliumpermanganatverbrauch		≤ 300 mg/L	
pH-Wert		Gleich oder wenig größer als der Gleichgewichts-pH-Wert		Ammoniumkonzentration		≤ 20 mg/L	
Karbonathärte im Wasser mit einer Strömungsgeschwindigkeit	≤ 0,5 m/s	≥ 6°dH, bzw. ≥ 2,14 mval/L		Sauerstoffgehalt im Wasser mit einer Strömungsgeschwindigkeit	≤ 0,5 m/s	≥ 6 mg/L	
	> 0,5 m/s	≥ 2°dH, bzw. ≥ 0,71 mval/L			> 0,5 m/s	≥ 2 mg/L	
Reduzierter Abdampfrückstand bei 180 °C		≤ 600 mg/L		Sulfatkonzentration im Wasser bei Karbonathärte < Nichtcarbonathärte		≤ 300 mg/L	
Reduzierter Glührückstand		≤ 550 mg/L		Chloridkonzentration im Wasser bei Karbonathärte	2 bis 6°dH	≤ 75 mg/L	
Elektrische Leitfähigkeit bei 20 °C		≤ 1.000 µS/cm			> 6 °dH	≤ 150 mg/L	
				Kupferkonzentration (nur für verzinkte Eisenwerkstoffe)		≤ 0,2 mg/L	

1966 wurde eine zweite Vornorm der DIN 50930 veröffentlicht, die an den aktuellen Stand des Wissens angepasst worden war [44]. Bei der Angabe der Anhaltswerte wurde nunmehr zwischen unverzinkten und verzinkten Eisenwerkstoffen unterschieden. Folgende Änderungen wurden aufgenommen:

- Die Angaben zum pH-Wert wurden durch den Sättigungsindex $I_{\text{Sätt}}$ nach Langelier ersetzt: $I_{\text{Sätt}}$ für unverzinkte Eisenwerkstoffe ≥ 0 ; für verzinkte Eisenwerkstoffe $\geq -0,5$
- Die Berechnung der reduzierten Abdampf- und Glührückstände sind entfallen, dafür wurden die Konzentrationen der Anionen Sulfat, Chlorid und Nitrat (nur für verzinkte Eisenwerkstoffe) aufgenommen und die zulässigen Konzentrationen verringert: Sulfationen ≤ 250 mg/L; Chloridionen ≤ 150 mg/L; Nitrationen ≤ 62 mg/L
- Die zulässige Kupferkonzentration (Cu^{2+}) im strömenden Wasser wurde auch für unverzinkte Eisenwerkstoffe aufgenommen – der Anhaltswert lag bei ≤ 1 mg/L; bei verzinkten Eisenwerkstoffen wurde der Wert auf $\leq 0,1$ mg/L gesenkt.

Auch hier galt die Bewertung: Das Wasser neigt zur Schutzschichtbildung nach DIN 50930, wenn die Anhaltswerte eingehalten werden. In dieser Version wurden offensichtlich die Untersuchungen von Larson zum Neutralsalzeinfluss aus Mitte der 1950er Jahre berücksichtigt und der Einfluss des Sulfats und Chlorids neu bewertet [45]. Die Vornorm wurde 1973 zurückgezogen.

Im Rahmen der Veröffentlichung der DIN 50930 im Jahr 1980 wurde die Struktur komplett überarbeitet und die Aussagen zu den Wechselwirkungen der metallenen Werkstoffe mit Trinkwasser bzw. Wässer ähnlicher Zusammensetzung werkstoffspezifisch neu strukturiert [46]. Für die Darstellung der zeitlichen Abfolge der in den Normen enthaltenen Angaben zu den wasserseitigen Korrosionsbedingungen wurden für diese Literaturstudie jeweils die Teile 1 und 2 der Nachfolgenormen ab 1980 ausgewertet, d.h. der Schwerpunkt liegt auf Guss- und Stahlrohren in der öffentlichen Trinkwasserverteilung.

Ausgangspunkt für die Betrachtung war nunmehr der Blickwinkel der Korrosionserscheinungen. Der Einfluss der Wasserbeschaffenheit wurde ab dieser Ausgabe im Hinblick auf die Korrosionsarten „Gleichmäßige Flächenkorrosion“ und „Ungleichmäßige Flächenkorrosion“ getrennt betrachtet.

Die Bildung von Schutzschichten wird gemäß DIN 50930-2, Ausgabe 1980, unter folgenden Voraussetzungen begünstigt:

- Sauerstoff: $c(\text{O}_2)$ möglichst $> 3 \text{ g/m}^3$; nicht $< 2 \text{ g/m}^3$
- pH-Wert möglichst hoch, aber $< 8,5$. Hierbei soll nach Möglichkeit eine Übersättigung an Calciumcarbonat vermieden werden.
- Säurekapazität bis pH 4,3 möglichst $> 2 \text{ mol/m}^3$; nicht $< 1,5 \text{ mol/m}^3$
- Calcium: $c(\text{Ca}^{2+})$ möglichst $> 0,5 \text{ mol/m}^3$
- Hinweis auf die Inhibitorwirkung von Phosphaten, Kieselsäure, Aluminiumverbindungen sowie noch nicht exakt definierbare organische Stoffe

Bei Vorliegen von Korrosionselementen (ungleichmäßige Flächenkorrosion, Muldenkorrosion) steigt die Geschwindigkeit der örtlichen Korrosion mit dem Gesamtsalzgehalt des Wassers an. Bei Vorliegen von Korrosionselementen kann die örtliche Korrosion begünstigt werden, wenn die folgende Bedingung gilt

$$\frac{c(\text{Cl}^-) + 2 c(\text{SO}_4^{2-})}{\text{Säurekapazität bis pH 4,3}} > 1$$

Im Kapitel Fließbedingungen wird davon ausgegangen, dass in sauerstoffhaltigen Wässern mit $c(\text{O}_2) > 2 \text{ g/m}^3$ die Fließgeschwindigkeit für die Schutzschichtbildung von ausschlaggebender Bedeutung ist. Sie sollte mindestens $0,1 \text{ m/s}$ betragen, um Stagnationen zu vermeiden.

Mit Übergang der Überarbeitung der Norm auf die Ausgabe 1993 wurden Erfahrungen aus dem Versuchsanlagenbetrieb innerhalb des FE-KKs bei der Zusammenstellung der wasserseitigen Leitparameter berücksichtigt. Bei den in den Normen enthaltenen Angaben zu den wasserseitigen Korrosionsbedingungen wurde die Bewertung von „Anhaltswerten“ in Aussagen zu „Korrosionswahrscheinlichkeiten“ abgeändert [47].

Werden die wasserseitigen Bedingungen für eine gleichmäßige Flächenkorrosion erfüllt, so bilden sich auf den Innenoberflächen von Rohrleitungen aus unlegierten oder niedriglegierten Eisenwerkstoffen bei entsprechenden Strömungsbedingungen (größer etwa $0,1 \text{ m/s}$) korrosionsschützende Deckschichten aus.

- $c(\text{O}_2) > 3 \text{ g/m}^3$
liegt $c(\text{O}_2)$ unter 2 g/m^3 können vermehrt Eisen(II)-Ionen abgegeben werden
- pH-Wert $> 7,0$
- $K_{\text{S}4,3} > 2 \text{ mol/m}^3$
- $c(\text{Ca}^{2+}) > 1 \text{ mol/m}^3$
- Hinweis auf die Inhibitorwirkung von Phosphaten, Kieselsäure, Aluminiumverbindungen sowie noch nicht exakt definierbare organische Stoffe

Die Deckschichtbildung ist gemäß der DIN 50930 erschwert und ungleichmäßig, wenn der Anionenquotient S_1 aus den Neutralsalzgehalten von Nitrat, Chlorid, Sulfat im Verhältnis zum Karbonatgehalt (Pufferung) den angegebenen Wert von 1 überschreitet.

$$S_1 = \frac{c(\text{NO}_3^-) + c(\text{Cl}^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})}{\text{HCO}_3^-}$$

Die Angaben der DIN 50930-2 entsprechen im Wesentlichen auch den Festlegungen der DIN 50930-6, die die Anwendungsbereiche für metallene Werkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser bis zur Übernahme der Regelungen in die Liste der trinkwassergeeigneten Werkstoffe des Umweltbundesamtes enthält [48]. Der Hinweis auf den Anionenquotient S_1 ist bei un- und niedriglegierten Eisenwerkstoffen weder in DIN 50930-6 noch in DIN EN 12502-5 [49], die den aktuellen Stand des harmonisierten Korrosionswissens darstellt, enthalten. Im Allgemeinen wird heute davon ausgegangen, dass Lokalkorrosionserscheinungen, wie Lochkorrosion an verzinkten Stahlrohren bei S_1 -Werten kleiner 0,5 sehr unwahrscheinlich sind. Der Anionenquotient kann bei ungeschützten Stahl- und Gussrohren im Verteilungsnetz synonym als Bewertungsmaß für das Rostwasserbildungspotential verwendet werden. Bei S_1 -Werten kleiner 0,5 sind Rostwasserprobleme sehr unwahrscheinlich [45]; [50].

Als Fazit lässt sich festhalten, dass ausgehend von den Angaben 1956 zu den wasserchemischen Leitparametern bis zur Ausgabe 1993 eine deutliche Einschränkung der Bewertungsmaßstäbe erfolgt ist und eine stärkere Betonung der Trendaussagen in den Fokus gerückt ist. Dies gilt insbesondere für Angaben der Zusammenhänge zwischen Sauerstoffgehalt und Fließgeschwindigkeit des Wassers.

Die Angabe von Einzelkonzentrationen, z. B. bei Chlorid, Sulfat und Nitrat ist auf Basis der Arbeiten von Larson einer Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Neutralsalz-Anionen und Pufferung des Wassers gewichen und spiegelt die deutlich komplizierteren Mechanismen

und Wechselbeeinflussungen der genannten Wasserparameter wider. In der DIN EN 12502-5 werden allerdings diese Zusammenhänge nur noch innerhalb des Textes erwähnt, der direkte Hinweis auf den Neutralsalzquotienten S_1 fehlt [49].

In den Ausgaben der DIN 50930 ab 1993 sind die Hinweise auf die Einstellung des Gleichgewichts-pH-Wertes und den Sättigungsindex nach Langelier entfallen. Die Normen lehnen sich an die Arbeiten von Kuch zu den Mechanismen der instationären Korrosion an.

Ab der Ausgabe der DIN 50930-1, Ausgabe 1980 sind Verweise auf das DVGW Arbeitsblatt W 601 bzw. W 216 enthalten.

Die einzelnen Überarbeitungen der Norm entsprechen dem jeweiligen aktuellen Stand der technisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse.

3.3 Historische Entwicklung des Arbeitsblattes W 216 – das Arbeitsblatt W 601

Am 28./29. April 1969 beschloss der DVGW-Hauptausschuss Wassergüte und –Aufbereitung, einen „Fachausschuss Wassermischung“ zu gründen [51]. Ziel war es, die in Deutschland vorhandene Diskussion zur Problematik der Nutzung von Wässern verschiedenen Ursprungs zur Sicherung der Trinkwasserversorgung aufgrund eines höheren spezifischen Wasserverbrauchs insbesondere durch eine stärkere Bevölkerungsentwicklung auf nationaler und internationaler Ebene zu diskutieren. Internationale Erfahrungen sollten genutzt werden, um nationale Lösungsansätze ableiten oder validieren zu können.

Der Vortrag bzw. die Veröffentlichung von Oehler anlässlich des IWSA Kongresses in Wien 1969 kann als Grundsatzpapier zur Erarbeitung des W 601 angesehen werden. Oehler war später auch Obmann desjenigen Fachausschusses, der für die Erarbeitung des W 601 zuständig war.

Hier wurden im Wesentlichen erstmals diejenigen Parameter bzw. die in der Fachdiskussion stehenden Sachzusammenhänge dargestellt, die bei der Mischung von Wässern im damaligen Verständnis auftreten können. Da diese Grundsatz-Thesen ferner bei dem IWSA Kongress in Wien vorgestellt wurden, haben sie auch internationale Beachtung und Berücksichtigung gefunden, wie z.B. die Arbeiten von Troyano zur (Misch-)Wasserversorgung von Barcelona zeigen [52].

Im Folgenden wird näher auf die IWSA-Veröffentlichung von Oehler eingegangen [53]; [51] und die grundsätzlichen Themen bzw. Thesen werden im Detail vorgestellt:

- Mischungsprobleme bei Mischung von Wässern aus Fernwasserversorgung und örtlichen Wasservorkommen: Wasserqualitätsprobleme können auftreten, wenn sich die Zusammensetzung des Fernwassers und das örtliche Rohwasser aufgrund seines unterschiedlichen geologischen Ursprungs deutlich unterscheiden. Gleichgelagerte Probleme können auch auftreten, wenn sich Grundwässer in ihrer Beschaffenheit deutlich unterscheiden.
In diesem Zusammenhang wurden insbesondere die Erfahrungen der Nutzung von küstennahen Brunnen mit teilweise sehr hohen Salzgehalten und die Nutzung von Uferfiltrat in Rheinnähe genannt. Ferner können bei der Nutzung von Flusswasser aufgrund der möglichen starken jahreszeitlichen Schwankungen und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Mischwasserhältnisse relevante Korrosionsprobleme resultieren.
- Mischung von harten und weichen Wässern: Es wird davon ausgegangen, dass die Mischung von harten und weichen Wässern zu Korrosionsproblemen führt, da die Mischung von im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befindlichen Wässern meist aggressiv wird.
- Organische Belastung: Als mögliches korrosionschemisches Problem wird die unterschiedliche Belastung von Oberflächen- und Grundwässern mit organischen Inhaltstoffen angesehen. Als Folge der Mischung im Verteilungssystem kann es zur Änderung der biologischen Verhältnisse im Rohrnetz mit Folgen der Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigung und auch zur Keimvermehrung kommen.
- Temperaturunterschiede: Als einer der wesentlichen korrosionschemischen Einflussfaktoren wurde der jahreszeitliche Einfluss auf die Temperatur im Oberflächenwasser angesehen. Temperaturänderungen können zu einer Schichtung des Wassers im Wasserbehälter führen, wodurch die Durchmischung erschwert wird. Als weitere Faktoren wird der Einfluss von Temperaturänderungen auf das Kalk-Kohlensäure Gleichgewicht und das Korrosionsverhalten der metallenen Werkstoffe angesehen (Anmerkung der Autoren: Eine Temperaturerhöhung von 10 K erhöht in der Regel die Korrosionsgeschwindigkeit um den Faktor 2).
- Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht: Der Einfluss des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts (KKG) wird zu dieser Zeit für das Verhalten der Werkstoffe im Rohrnetz und der Trinkwasser-Installation der Verbraucher als elementar angesehen. So wird die

Empfehlung ausgesprochen, nur Wässer zu verteilen, die im KKG stehen.

Oehler beruft sich auf die grundlegenden Arbeiten u.a. von Tillmans und Langelier, die seiner Meinung nach insbesondere durch Axt, Steinrath und Hässelbarth überprüft und erweitert wurden [54]; [36]; [55]; [42]; [56]. Bei der Betrachtung des KKG wurde insbesondere von Hässelbarth der Einfluss der Neutralsalze mit berücksichtigt [56].

Nach Axt gibt es Gleichgewichtswässer, die in ihrer chemischen Zusammensetzung sehr verschieden sind, deren Mischung aber als „korrespondierende Gleichgewichtswässer“ wieder im Gleichgewicht stehen [57]. Demgegenüber müssen nach Tillmans Mischungen aus verschiedenen Gleichgewichtswässern stets mehr oder weniger kalkaggressiv sein [54].

Die Einhaltung des KKG wird nicht als absolut sicherer Weg zur Vermeidung von Korrosion bzw. von Korrosionsschäden angesehen. Hierbei bezieht sich Oehler auf die Angaben der DIN 50930 (Vornorm Ausgabe 1966-01, zurückgezogen 1973), die besagen, dass Wasser dann eine Schutzschichtbildung bei eisengebundenen Werkstoffen unterstützt, wenn der Langelier-Index 0 ist oder positiv ($L/I \geq 0$). Bei verzinkten Stahlrohren sollte demnach der Langelier-Index positiver als -0,5 sein ($L/I \geq -0,5$).

Nach Auffassung von Axt wird eine Schutzschichtbildung auch verhindert, wenn der Langelier-Index den Wert Null in positiver Richtung übersteigt. Eine gewisse Sicherheit zur Schutzschichtbildung gewährleistet die Einhaltung des Langelier-Index von $\pm 0,07$. Hierbei muss der Sauerstoffgehalt bei mindestens 6 mg/L liegen [57].

- Mischung von Wässern zur Einhaltung von Grenzwerten (z.B. Nitrat): Die Veröffentlichung enthält Angaben zur Anfertigung entsprechender Mischungsdiagramme für zwei bzw. drei Komponenten (Abbildung 3.1) zur Einhaltung der Grenzwerte der TrinkwV

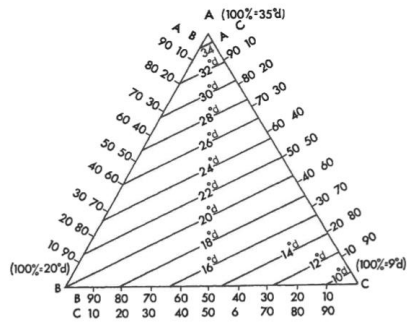
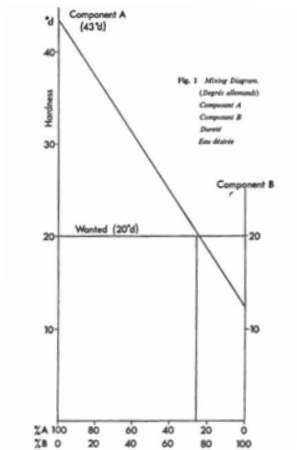


Fig. 2: Mixing Diagram for three components.
 Diagramme de mélange pour trois composants (Degrés allemands)

Abbildung 3.1: Mischungsdiagramme [53]

Oehler macht in der IWSA-Veröffentlichung auch Angaben zur Mischung der Wässer und die möglichen Aufbereitungsverfahren zur Einstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes.

Bei der Art der Mischung beschreibt er die Problematik bei Auftreten von Pendelwässern bei der Mischung im Netz und die Vorteile der zentralen Mischung im Behälter, bei den Aufbereitungsverfahren die Angleichung der Wasserqualitäten und den Einsatz von Korrosionsinhibitoren.

- Art der Mischung
 - Pendelzonen
 - Mischung im Behälter
- Aufbereitungsverfahren
 - Entsäuerung
 - Enthärtung
 - Aufhärtung
 - Chemikalienzusatz – Einsatz von Inhibitoren

Als Fazit kann festgestellt werden, dass die wesentlichen Gesichtspunkte, die auch in der Erarbeitung des W 601 verarbeitet wurden, von Oehler aufgeführt wurden. Aus dieser Veröffentlichung und den darin enthaltenen Literaturhinweisen lassen sich erste Rückschlüsse auf die Wahl der Parameter-Festlegungen innerhalb des W 601 treffen.

3.4 Das DVGW Arbeitsblatt W 601

Im Zusammenhang mit der Erarbeitung des W 601 wurde in Hamburg im Oktober 1973 vom Fachausschuss ein Symposium abgehalten, bei dem die verschiedenen Fragen zur „Versorgung mit unterschiedlichen Wässern“ in einem größeren Kreis von Fachleuten diskutiert wurden. Die bei dem Symposium gehaltenen Referate sind in der DVGW-Schriftenreihe Wasser, Nr. 6 zusammengefasst [58]. Im Einzelnen handelt es sich um folgende Beiträge:

- Probleme bei der Versorgung mit Wässern verschiedener Herkunft – Einführung in das Thema (Oehler, K. E.)
- Hamburger Wasserversorgung und ihre Probleme durch unterschiedliche Wasserzusammensetzung (Mevius, W.)
- Zur Einstellung der Calciumcarbonatsättigung bei der Versorgung mit unterschiedlichen Wässern (Grohmann, A. & Meyer, E.)
- Mischwasserversorgung in Bremen aus Sicht des Wasserchemikers (Madsen, S.)
- Großräumige Wasserversorgung im süddeutschen Raum (Schubert, J.)
- Technische Lösungen bei der Versorgung mit verschiedenen Wässern (Soiné, K. J.)
- Möglichkeiten der Wasseraufbereitung zur Angleichung der Wasserzusammensetzung (Normann, S.)

In den Fachbeiträgen werden die verschiedenen Aspekte bei der Versorgung mit unterschiedlichen Wässern, meist an konkreten Beispielen, beleuchtet. Teilaspekte wurden in das W 601 übernommen.

Zur Thematik „Versorgung mit unterschiedlichen Wässern“ wurde 1976 das DVGW Arbeitsblatt W 601 veröffentlicht [16]. Anlass zur Veröffentlichung war, dass zur Gewährleistung der

Trinkwasserversorgung häufig Wässer gemischt werden müssen, deren Zusammensetzung sich mehr oder weniger stark unterscheiden kann. Bei der Verteilung sind insbesondere

- Unterschiede zwischen Oberflächen- und Grundwässern
- Fernversorgung von Trinkwasser aus anderen geologischen Formationen zur Sicherstellung der Wassermenge am Zielort

zu berücksichtigen.

In dem Arbeitsblatt heißt es, dass die Versorgung mit unterschiedlichen Wässern so erfolgen soll, dass keine Nachteile für die Wasserwerksanlagen einschließlich des Rohrnetzes und für die Abnehmer entstehen sollen. Zu diesem Zwecke sei daher folgendes anzustreben:

- gleichbleibende chemische Zusammensetzung (Industrie, technischer Haushalt)
- möglichst geringe Unterschiede der Wassereigenschaften in einem Versorgungsgebiet
- Vermeidung von Korrosion im Rohrnetz und Trinkwasser-Installationen
- Vermeidung von Inkrustierungen

Im Sinne des Arbeitsblatts W 601 liegen unterschiedliche Wässer dann vor, wenn sie sich in mindestens einem der Kennwerte

- pH-Wert,
- Ionenkonzentration,
- Sauerstoffkonzentration,
- Gehalt an organischen Stoffen
- Temperatur

deutlich voneinander unterscheiden.

Von „deutlichen Unterschieden“ wird im W 601 dann gesprochen, wenn in den zu betrachtenden Wässern bestimmte Obergrenzen, definiert über Differenzen bzw. Quotienten, bei mindestens einem der genannten Parameter überschritten werden. Die angegebenen Zahlenwerte der Obergrenzen würden dabei auf geschätzten Richtwerten beruhen, die jedoch nicht als starre Grenzwerte zu betrachten sind.

Abbildung 3.2 zeigt eine Zusammenstellung der Kriterien zur Einordnung in „Wässer unterschiedlicher Beschaffenheit“ inklusive einer thematischen Zuordnung.

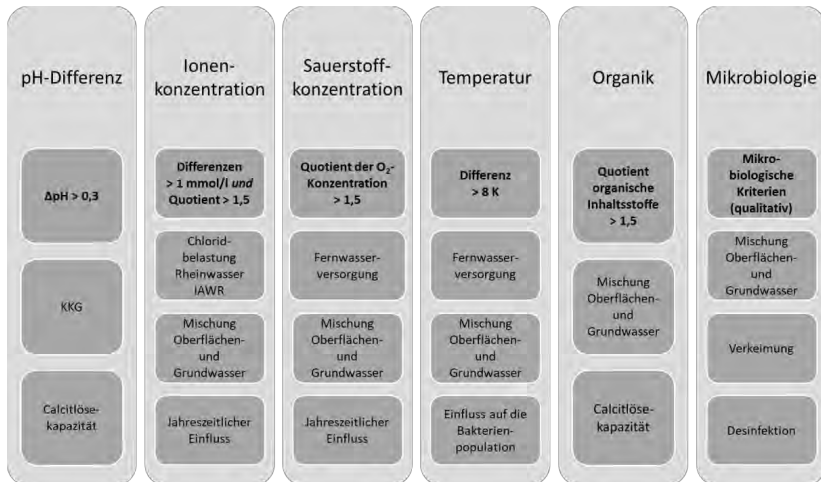


Abbildung 3.2: Kriterien zur Einordnung von Mischwässern in „Wässer unterschiedlicher Beschaffenheit“ auf Basis des W 601

Den Kriterien ist der Wissenstand zum Korrosionsverhalten der eisengebundenen Werkstoffe zugrunde zu legen, da diese den Hauptteil der zu dieser Zeit verlegten Rohrleitungswerkstoffe im Verteilungsnetz (Graugussrohre), der Trinkwasser-Installation und den Hausanschlussleitungen (verzinkte Stahlrohre) ausmachten.

Auf Basis der Literaturrecherchen können die Richtwerte auf folgende Arbeiten zurückgeführt werden:

- Die pH-Differenz ist größer als 0,3

Die Festlegung eines „korrosionskritischen“ ΔpH -Wertes von $> 0,3$ ist im Wesentlichen auf die Arbeiten von Tillmans und Langelier zurückzuführen. Die Abweichung des pH-Wertes vom pH-Wert der Calcitsättigung mit einem ΔpH -Wert von $\pm 0,2 \text{ pH}$ -Einheiten war Bestandteil der Trinkwasserverordnung von 1990.

- Die Differenzen der Ionenkonzentrationen überschreiten die Größenordnung von 1 mmol/L und der Quotient der Ionenkonzentrationen liegt über 1,5

Hier kann davon ausgegangen werden, dass zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des W 601 Ergebnisse aus Abdampf- und Glührückstandsuntersuchungen zugrunde liegen: Werte werden ohne Karbonathärte angegeben, d.h. Abdampf- und Glührückstand müssen um diesen Wert verringert werden [42].

Der Hinweis auf den Quotient der Ionenkonzentration weist auf den Larson-Index hin, der Chlorid, Sulfat und Hydrogencarbonat ins Verhältnis setzt [45].

- *Der Quotient der Sauerstoffkonzentration liegt über 1,5:*

Abbildung 3.3 zeigt den Einfluss des Sauerstoffgehaltes auf die Korrosionsrate von Stahlrohren. Zum Versuchszeitpunkt bei ca. 150 Tagen wurde die Sauerstoffkonzentration von 3 mg/L auf 6 mg/L erhöht. Die Grafik zeigt zum nächsten Messpunkt eine deutliche Erhöhung der Korrosionsrate, wobei nahezu über den gesamten Zeitraum ein gleichbleibend hohes Niveau erhalten blieb. Dies unterscheidet sich deutlich von den Anfangsbedingungen. In diesem Zeitraum ergibt sich ein fallender Kurvenverlauf, gleichbedeutend mit einem Rückgang der Geschwindigkeit, mit der der Werkstoff korrodiert wird.

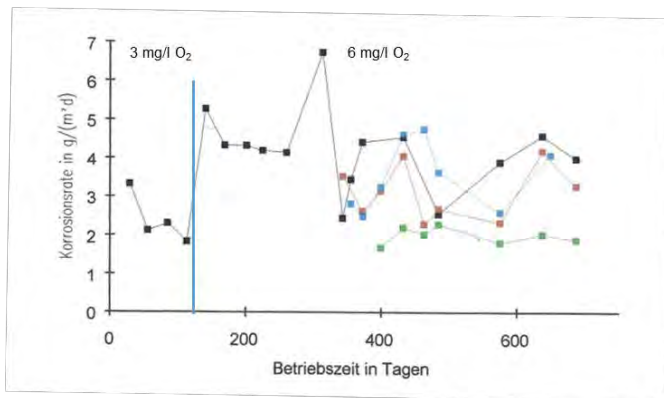


Abbildung 3.3: Einfluss des Sauerstoff-Gehaltes auf die Korrosionsrate bei kontinuierlich durchflossenen Stahlrohren (Quelle: IWW)

Ein direkter Hinweis auf die Festlegung des Quotienten wurde in der Literatur nicht gefunden, allerdings zeigen die oben dargestellten Untersuchungsergebnisse den deutlichen Einfluss der Änderung der Sauerstoffkonzentration im unteren Konzentrationsbereich. Hier sollte man auch erwarten, dass sich Konzentrationsunterschiede stärker bemerkbar machen.

- *Der Quotient der Gehalte an organischen Stoffen liegt über 1,5*

Hier ist davon auszugehen, dass sich diese Festlegungen auf Untersuchungen zur Nutzung des Rheins zur Trinkwassergewinnung bezieht; die Festlegung des Quotienten lässt sich aus der zur Verfügung stehenden Literatur, z.B. der IAWR aber nicht direkt ableiten

- *Die Temperaturdifferenz ist größer als 8 K:*

Diese Festlegung stammt aus Untersuchungen zur Schichtung von Wässern in unterschiedlichen Tiefen und der Vermischung von Oberflächen- und Grundwasser; Normann (1976) weist auf Probleme der Vermischung von Wässern unterschiedlicher Temperatur in Trinkwasserbehältern hin [59]

Grundsatzuntersuchungen wurden z.B. von Bauer 1925 zum Einfluss der Temperatur auf die Korrosion von Eisen durchgeführt. Er kommt zu dem Ergebnis, dass schon kleine Temperaturschwankungen zum Anstieg des Massenverlustes führen; so führt eine T-Erhöhung von 15 auf 18 °C zu einem Anstieg des Massenverlustes an Eisen von 0,15 auf 0,18 g Fe.

Abbildung 3.4 zeigt Ergebnisse aus Korrosionsversuchen zum Einfluss des Temperatureffektes auf die Korrosionsrate von Eisen. Die Grafik zeigt die deutliche Streuung der Werte bei 25 °C (Reaktion des Systems auf Temperaturstörungen) und die höhere Korrosionsrate über den gesamten Versuchszeitraum. Begleitende Deckschichtuntersuchungen zeigten, dass die Störung der Deckschichtbildung durch Temperaturwechsel auch negative Auswirkungen auf die Morphologie und Eigenschaften der Eisendeckschichten hatten

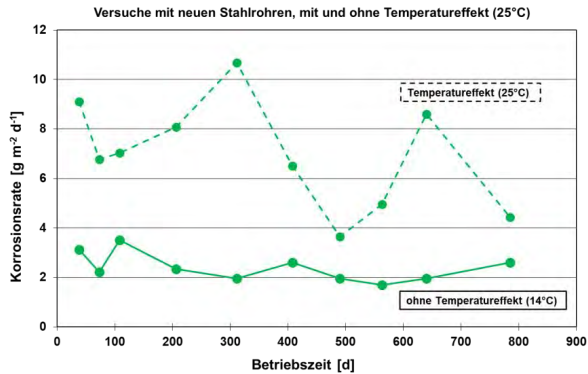


Abbildung 3.4: Einfluss der Temperaturänderung auf die Korrosionsrate von Stahlrohren ST 37, Versuchsanlagenbetrieb (Quelle: IWW)

Die Einhaltung der Temperaturdifferenz spielt auch in neueren Untersuchungen eine Rolle, bei denen Mischwasserprobleme u.a. auf zu hohe Temperaturschwankungen zurückgeführt wurden, z.B. bei der Wasserversorgung von Paris [60]; [61]; [62]; [63].

- *Mikrobiologische Kriterien:*

Hier sind Erfahrungen aus der Mischung von Oberflächen- und Grundwässern zu nennen, bei denen Verkeimungen und Auswirkungen auf die Desinfektionswirksamkeit beschrieben wurden

Die Mischung von Wässern mit einer unterschiedlichen Belastung mit organischen Wasserinhaltsstoffen führt zu einer Veränderung der mikrobiologischen Verhältnisse; die Veränderung des Milieus hat Auswirkungen auf die Wachstumsbedingungen von Mikroorganismen

Untersuchungen von Troyano im Nachgang zu dem IWSA-Vortrag von Oehler zeigen, dass bei Temperaturunterschieden von $\pm 5\text{ °C}$ und bei Veränderung des pH-Wertes um eine pH-Einheit kein Einfluss auf die Bakterienpopulation festgestellt werden konnte [52].

Als Fazit kann zusammengefasst werden, dass das W 601 im Wesentlichen die Erfahrungen und Kenntnisse zur Korrosionschemie und die mikrobiologischen Auswirkungen bei Mischung von Wässern unterschiedlicher Beschaffenheit aufgreift. Während es sich bei den Aussagen

zur Korrosionschemie im Wesentlichen um den wissenschaftlichen Stand bis 1969 und entsprechende Praxiserfahrungen handelt, werden bei der Betrachtung der mikrobiologischen Konsequenzen wahrscheinlich eher Erfahrungswerte aus der Praxis zugrunde gelegt, da diese qualitativen Aussagen eher einen informativen Charakter aufweisen.

Die Auswahl der Parameter unter Berücksichtigung der Korrosionschemie der Wässer beruhen im Wesentlichen auf der Wechselwirkung zwischen Wasser und eisengebundenen Werkstoffen, da diese in diesem Zeitraum im Rohrnetz (Guss- und Stahlorohre ohne ZM und verzinkter Stahl als Hausanschlussleitung) und in der Trinkwasser-Installation (verzinkter Stahl) prioritär verlegt waren. Eingehende Untersuchungen zum Korrosionsverhalten und mechanistische Betrachtungen der Deckschichtbildung führten dann auch zu Angaben von Richtwerten bis hin zu normativen Hinweisen zur Bewertung des Korrosionserhaltens von un- und niedriglegierten verzinkten und nicht verzinkten Eisenwerkstoffen.

Sowohl die Auswahl der Bewertungsparameter als auch die Festlegung ihrer Kriterien sind aus der Literatur im Wesentlichen nachvollziehbar.

3.5 Das Arbeitsblatt W 216, Ausgabe 1983 – Überarbeitung des W 601

Das W 601 wurde durch den Fachausschuss „Stabilisierung“ überarbeitet und unter der neuen Nummer W 216 „Versorgung mit unterschiedlichen Wässern“ 1983 veröffentlicht [15]. Laut Vorwort des W 216 wurde die Überarbeitung aufgrund einer „Reihe neuer Erkenntnisse“ notwendig. Insbesondere wurde die Definition der Unterschiedlichkeit von Wässern verbessert und die zeitlich wechselnde Beschaffenheit eines Wassers berücksichtigt.

Der Charakterisierung der Unterschiedlichkeit von Trinkwässern und der Einstufung von Wässern in eine zeitlich gleichmäßige oder wechselnde Beschaffenheit wurden folgende Parameter zugrunde gelegt:

- Temperatur
- Sauerstoff
- pH-Wert
- Säurekapazität bis pH 4,3 ($K_{S4,3}$)
- Neutralsalze: Chlorid, Sulfat, Nitrat

- Phosphat
- Gelöster organisch gebundener Kohlenstoff (DOC)
- Härtebildner: Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium

Bei dem Übergang zum W 216 wurde die Palette der in die Bewertung einbezogenen Parameter deutlich um die Gruppe der Neutralsalze inklusive Nitrat, der Härtebildner und des Phosphats als Inhibitor Komponente erweitert. Tabelle 3.5 zeigt eine Gegenüberstellung des unterschiedlichen Parameterumfangs unter Berücksichtigung der Ausgabe des W 216 von 2004.

Tabelle 3.5: Veränderung der zur Bewertung verwendeten Parameter unter Berücksichtigung der Überarbeitung des W 216 zur aktuellen Ausgabe 2004

W 601	W 216, Ausgabe 1983	W 216, Ausgabe 2004
pH-Wert	pH-Wert	pH-Wert
Ionenkonzentration (red. Abdampf- und Glührückstand)	Ionenkonzentration (Larson)	Ionenkonzentration (Larson)
Temperatur	Temperatur	Temperatur
Gehalt an organischen Stoffen	DOC	DOC → TOC
Sauerstoff	Sauerstoff	Sauerstoff
	Chlorid	Chlorid
	Sulfat	Sulfat
	Nitrat	Nitrat
	Phosphat	Phosphat
	Säurekapazität bis pH 4,3	Säurekapazität bis pH 4,3
	Härte	Härte

Bei der Ionenkonzentration kann ab Erscheinen des W 216 davon ausgegangen werden, dass bei der Bewertung der Larson-Index zugrunde gelegt wurde, nicht mehr der um das Hydrogencarbonat reduzierte Abdampf- und Glührückstand. Nitrat wurde im Wesentlichen aufgrund des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung aufgenommen, um durch entsprechende Mischung von Wässern den Grenzwert einhalten zu können [64]. Dieses wurde bei der Überarbeitung des W 216 wieder rückgängig gemacht, da der Schutz des Einzugsgebietes und die Kooperation mit der Landwirtschaft zur Vermeidung der Überdüngung der Felder zur Verminderung des Nitratreintrags in das Grundwasser im Fokus stand [65].

Ab den 1970er Jahren erfolgte vermehrt der Einsatz von Phosphat zum Korrosionsschutz von Grauguss und ungeschützten Stahlrohren im Rohrnetz und damit zur Sanierung von Rostwasserproblemen. Diese Maßnahmen standen in diesem Zeitraum auch im Zusammenhang mit der Zunahme der zentralen Enthärtung. Die Festlegung von Richt- und Grenzwerten mit Erscheinen der Trinkwasserverordnung von 1990 für Kupfer und Blei führte auch dazu, dass Inhibitoren zunächst auf Phosphatbasis zur Verringerung der Kupfer- und Bleilöslichkeit eingesetzt wurden. Zur Gewährleistung des Korrosionsschutzes ist es notwendig, den Inhibitor in einer individuell der Wasserbeschaffenheit angepassten Menge zu dosieren, so dass insbesondere bei der Mischung von Wässern, bei denen nur in einem Wasser Phosphat enthalten ist, nicht eine Unterdosierung resultiert, die sich ungünstig auf das Korrosionsverhalten der Werkstoffe auswirken kann.

Als weitere Änderung wurden für die Parameter Skalen und Bereichsbreiten festgelegt, deren Schwankungsbreite einen bestimmten Wert nicht überschreiten darf. Die Bewertung von Wässern erfolgt grafisch anhand von wertegenauen Parameterskalen und einer Bereichsbreite, innerhalb derer die Parameterwerte liegen müssen, um die Wässer mit gleicher bzw. gleichmäßiger Beschaffenheit zu definieren. Die Parameterskalen wurden anhand von Erfahrungswerten festgelegt.

Die Vorgehensweise, für die Bewertung Parameterskalen zu nutzen, erinnert an die in den USA bevorzugte Darstellung der Kalkulation von Wasserparametern in Form von Skalen und Nomogrammen [66] (Beispiel in Abbildung 3.5). Die feste Bandbreite für alle Parameter dient hierbei der Vereinfachung der Handhabung [65].

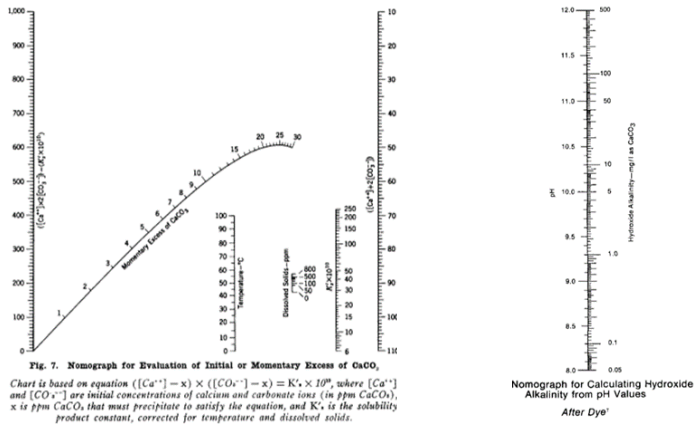


Abbildung 3.5: Nomogramm-Darstellung [67] als Vorlage für das Bandbreiten-Konzept

Zusätzlich werden Mischungsdiagramme eingeführt, die bereits schon in der Veröffentlichung von Oehler 1969 [53] vorgestellt worden sind (siehe Kapitel 3.3).

Aufgrund der Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom Mai 2001 wurde es notwendig, das W 216 bezüglich der Anforderungen an den pH-Wert bzw. die Calcitlösekapazität zu ergänzen.

Das Bandbreiten-Konzept passt nach den Kalkkohlenensäuregleichgewichtsberechnungen für den Parameter $K_{S4,3}$, da in diesem Fall der trinkwasserrelevante Parameter Calcitlösekapazität im Mischwasser zumindest im unteren Konzentrationsbereich eingehalten wird.

Die Vorgaben von den weiteren aktuell sechs Parametern (Chlorid, Sulfat, Sauerstoff, Anionenquotient, Phosphat und TOC (Huminstoffe)) sind zum größten Teil auf Basis der Literatur nachvollziehbar und decken sich mit den vorliegenden Forschungsergebnissen früherer Untersuchungen.

Neben der Berücksichtigung der Korrosionschemie und der Mikrobiologie wird mit der Vergleichmäßigung der Zusammensetzung der Mischwässer auch angestrebt, für den Verbraucher Wässer möglichst gleichmäßiger Härte zur Verfügung zu stellen und starke Härteschwankungen mit der verpflichtenden Angabe des Härtebereiches gemäß des Wasch- und Reinigungsmittelgesetzes zu vermeiden [68]. Unter diesen Gesichtspunkten wurden die Härtebilder in das Arbeitsblatt mit aufgenommen. Die Mischungsregeln ermöglichen darüber hinaus, bestimmte Konzentrationen gezielt zu verringern, um z.B. Grenzwerte der Trinkwasserverordnung einhalten zu können [69].

4 Das Arbeitsblatt W 216

In der aktuellen Fassung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 (August 2004) wird die Mischbarkeit von Trinkwässern anhand ihrer Unterschiedlichkeit der Beschaffenheit beurteilt, die dementsprechend die erforderlichen Maßnahmen vorgibt. Die Beurteilung erfolgt mittels der korrosionschemisch relevanten Parameter Sauerstoff, Säurekapazität bis pH 4,3, Chlorid, Sulfat, Phosphat und organisch gebundener Kohlenstoff (TOC). Sofern die Schwankungsbreite dieser Parameter aus der jeweils niedrigsten und höchsten Konzentrationen nicht ein im DVGW-Arbeitsblatt W 216 vorgegebenes Bewertungsmaß überschreitet, sind die Wässer von gleicher Beschaffenheit und aus korrosionschemischer Sicht im beliebigen Verhältnis mischbar.

Die zulässigen Schwankungsbreiten können jeweils aus einer im DVGW-Arbeitsblatt W 216 angegebenen konzentrationsabhängigen Parameterskala des Bewertungsmaßes gemäß Abbildung 4.1 entnommen werden.

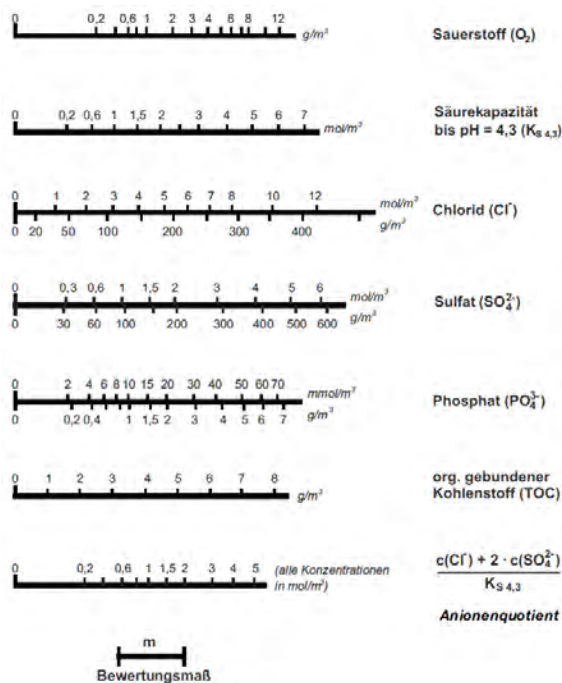


Abbildung 4.1: Graphische Ermittlung der zulässigen Schwankungsbreite (DVGW-Arbeitsblatt W 216, August 2004)

Das Bewertungsmaß kann zudem rechnerisch aus der Differenz der Prüfwerte P für die jeweiligen Ausgangswässer ermittelt werden. Es resultieren hierbei wertegenaue Beurteilungskennwerte. Die Mischwasserkriterien sind erfüllt, sofern das berechnete Kriterium

$|P_{\max} - P_{\min}| < 1$ bei allen relevanten Parametern eingehalten ist. In Tabelle 4.1 sind die im Arbeitsblatt vorgegebenen Formeln der Einzelparameter aufgelistet.

Tabelle 4.1: Numerische Bestimmung des Bewertungsmaßes (DVGW W 216)

Parameter	Formel	Einheit
Sauerstoff	$P = 1,967 \times c^{0,290}$	c in g/m ³
Säurekapazität	$P = 1,509 \times c^{0,556}$	c in mol/m ³
Chlorid	$P = 0,609 \times c^{0,816}$	c in mol/m ³
Sulfat	$P = 1,643 \times c^{0,590}$	c in mol/m ³
Phosphat	$P = 0,612 \times c^{0,443}$	c in mmol/m ³
org. geb. Kohlenstoff	$P = 0,500 \times c + 0,500$	c in g/m ³
Anionen-Quotient q_A	$P = 1,998 \times q^{0,379}$	–

Sind die konzentrationsabhängigen Schwankungsbreiten der Ausgangswässer jeweils eingehalten, liegen Wässer von gleicher Beschaffenheit vor, die im beliebigen Verhältnis gemischt werden können, ohne dass korrosionschemische Probleme zu erwarten sind. Sofern ein Parameter das Kriterium nicht erfüllt, wird das zulässige Mischungsverhältnis anhand dieses Parameters festgelegt. Im Arbeitsblatt wird hierzu ein Beispiel zur Festlegung des zulässigen Mischungsverhältnisses für den Parameter Sulfat angegeben (Abbildung 4.2). Das Mischungsverhältnis kann prinzipiell beliebig gewählt werden, sofern für ein bestimmtes Mischungsverhältnis die jeweils geltende Bandbreite eingehalten wird.

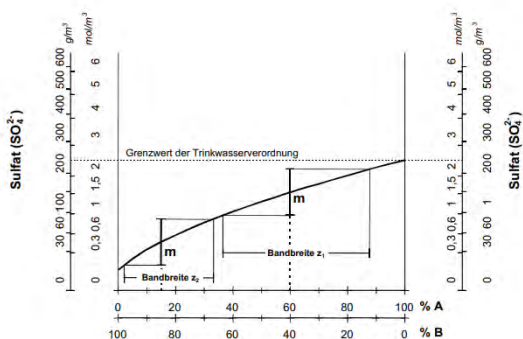


Abbildung 4.2: Festlegung des zulässigen Mischungsverhältnisses hinsichtlich der Sulfat-Ausgangskonzentrationen von 30 mg/L (Ausgangswasser B) bzw. 300 mg/L (Ausgangswasser A)

Grundsätzlich muss das Mischwasser bei jedem beliebigen Mischungsverhältnis die gesetzlichen Vorgaben an den pH-Wert bzw. der Calcitlösekapazität einhalten. Diese Forderungen gelten als erfüllt, wenn die Calcitlösekapazität im Fall einer zentralen Mischung (Ausgang Wasserwerk) bei $< 5 \text{ mg/L CaCO}_3$, bzw. bei einer dezentralen Zumischung (Netzeinspeisung) bei $< 10 \text{ mg/L CaCO}_3$ liegt.

Bei der Mischung von Ausgangswässern, die sich jeweils im Kalkkohensäure-Gleichgewicht befinden, jedoch von unterschiedlicher Beschaffenheit sind, kann ein calcitlösendes Mischwasser resultieren, wodurch Maßnahmen zur Stabilisierung erforderlich sind.

Die Parameterskalen der Bewertungsparameter entsprechen mit Ausnahme des Parameters TOC einen logarithmischen Kurvenverlauf. Wie aus Abbildung 4.3 hervorgeht, wirken sich Konzentrationsunterschiede bei geringerer Konzentration deutlich stärker auf die zulässige Schwankungsbreite aus als bei höheren Konzentrationen. Auffällig ist zudem ein weitestgehend identischer Kurvenverlauf für die Parameter Anionenquotient, Säurekapazität bis pH 4,3, Phosphat und Sauerstoff.

Für die Parameter TOC und Chlorid ist ein lineares Konzentrationsverhältnis zur Bandbreitenermittlung vorgegeben, gleichbedeutend, dass die korrosionschemischen Auswirkungen durch die TOC- bzw. Chlorid-Unterschiede unabhängig von der Konzentration der jeweiligen Ausgangswässer sind.

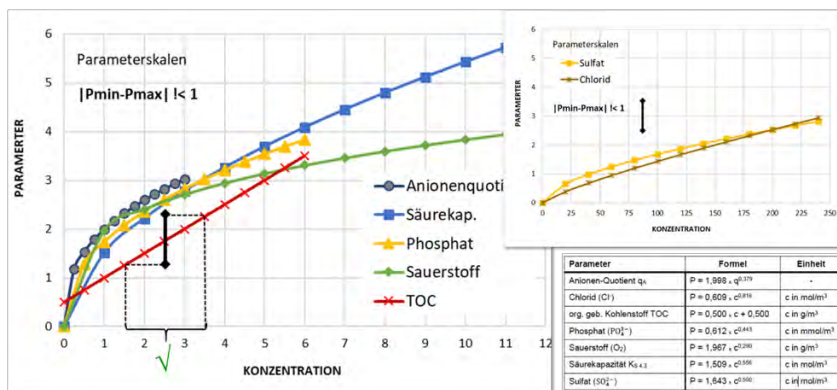


Abbildung 4.3: Parameterskalen zur Ermittlung der zulässigen Schwankungsbreite [DVGW-Arbeitsblatt W 216, August 2004]

4.1 Ergebnisse der Recherchen

4.1.1 Praxisrelevanz des W 216

Um die Umsetzung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 in der Praxis zu eruieren, wurden insgesamt 100 Wasserversorgungsunternehmen (WVU) zu möglichen Mischwasserproblemen in ihrem Versorgungsgebiet angeschrieben. Es wurden für die Umfrage explizit WVU ausgewählt, die auf Basis der vorliegenden Informationen Trinkwässer mit unterschiedlicher Beschaffenheit zur Trinkwasserversorgung bereitstellen. Die Unternehmen wurden persönlich per Email bzw. telefonisch um ihre Mithilfe gebeten. Das Anschreiben sowie der beigefügte Fragebogen gehen aus Anlage 1 hervor.

Die erste Umfrage erfolgte im Februar 2020, wobei der Rücklauf der Umfrage mit insgesamt sieben Antworten gering ausfiel. Von lediglich zwei WVU wurden hierbei Detailinformationen zur Mischwasserthematik abgegeben. Im März 2020 erfolgte eine zweite Umfrage. Um die Rücklaufquote zu erhöhen, wurde zusätzlich ein online-Fragebogen mittels des Befragungstools SurveyMonkey eingerichtet. Ferner wurde zeitgleich eine Homepage mit Zusatzinformationen zum DVGW-Forschungsprojekt GÜ W216 zur Unterstützung der Umfrage erstellt (Anlage 3).

Der Rücklauf von den insgesamt 100 befragten Unternehmen lag diesmal insgesamt bei 25 Antworten. Davon wurden von zehn WVU konkrete Angaben zur Mischwasserthematik abgegeben.

Von allen WVU wird angegeben, dass die Vorgaben des DVGW-Arbeitsblattes W 216 bei der Mischung der einzelnen Trinkwässer weitestgehend eingehalten werden. Es werden bei den Fällen, bei denen unterschiedlich beschaffene Trinkwässer gemischt werden, von keinen korrosionschemischen Auffälligkeiten berichtet. Demnach scheinen die Parameterskalen des DVGW-Arbeitsblattes W 216 sehr konservativ ausgelegt zu sein.

Die Übersicht der Umfrageergebnisse zeigt Tabelle 4.2. Die jeweiligen Überschreitungen (P_{\min} , P_{\max}) sind in der Ergebnistabelle jeweils rot markiert dargestellt. Für den Parameter pH-Wert wurde die Formel der Bandbreitenberechnung aus der früheren Arbeitsblattversion aus dem Jahr 1983 eingesetzt.

Die Mischwasserrelevanten Unterschiede zeigen sich im Wesentlichen bei der Säurekapazität bis pH 4,3 ($K_{S4,3}$) und dem pH-Wert. Die Mischwasserrelevanten $K_{S4,3}$ -Abweichungen bedeuten in den vorliegenden Fällen auch eine unzulässige pH-Wert-Abweichung. In einer geringeren Anzahl der Fälle ergeben sich gleichsam Überschreitungen hinsichtlich der Parameter Chlorid, Sulfat und TOC.

Bei einer dezentralen Mischung werden bei den WVU laut Umfrage vorsorglich Korrosionsinhibitoren zugesetzt. In einem Fallbeispiel wurde bei der Wasserumstellung auf weiches Trinkwasser zeitweise ein Phosphat-/Silikat-Präparat präventiv dosiert, da eine Trübungserhöhung bei der Wasserumstellung befürchtet wurde; nach mehreren Monaten wurde die Dosierung wieder stufenweise abgesetzt.

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Umfrageergebnisse von 100 WVU (Rücklaufquote ca. 25 %)

Fall	Sauerstoff mg/L	Härte		K54.3 mmol/L	pH-Wert berechn. lt.1983	Chlorid mg/L	Sulfat mg/L	TOC mg/L PD4	Phosphat mg/L PD4	Anionenindex	Mischverhältnis %											
		°GH	°dH																			
WVU-1	A	12	3,7	5	1	1,6	7,9	8,4	6,9	9,1	8,3	16,5	0,2	0,7	0,05	0,09	0,37	0,38	30	42		
	B	11,3	20	21	4,1	4,1	7,55	7,63	47	47	101	111	1,5	3,7	0,06	0,06	0,84	0,89	58	70		
	P min/max	0,07			1,35	1,80	0,64	2,02	0,57	0,61	1,11	1,40	0,40	1,75	0,04	0,10	0,49	0,54	63	66		
	Fremdwasser	11	5,2	6,3	1,48	1,68	7,63	7,85	8,2	12	19,4	24	0,47	0,91	0,02	0,05	0,43	0,50	63	66		
	C	10,3	23	24	6,33	7,41	7,26	7,48	51,4	59	65,4	75,2	0,59	0,63	0,06	0,06	0,45	0,44	94	36		
P min/max	0,07			2,20	2,72	0,36	1,40	0,58	0,75	0,58	0,78	0,16	0,08	0,19	0,04	0,07	0,01					
WVU-2	A	7	24	26	5,4	5,9	7,1	7,3	50	80	90	110	0,4	0,4	0,5	0,5	0,61	0,78	70	30		
	B	8,7	18,3	19,2	5,7	5,9	7,4	7,5	9,2	11	48	54	2,1	2,2	0,5	0,5	0,22	0,24	25	75		
	P min/max	0,23			0,08	0,19	0,95	0,24	0,99	0,58	0,69	0,41	0,85	0,90	0,00	0,00	0,69	0,49				
WVU-3	WWW				3,6		0,72	8,58	17,5									1,38		55		
	WWM				17,6		2,33	7,81	42,3									3,9	2,15	45		
	P min/max				3,16		1,88		0,37									1,68	0,85	0,41	keine Auffälligkeit	
	WWW				3,6		0,72	8,58	17,5										1,38		100	
	WWA				23,9		6,9	7,65	84,4					1	0,031				3,84		0	
	P min/max				3,16		2,21		0,91										1,53	0,60	0,37	keine Auffälligkeit
	WWM				17,7		2,3	7,79	42,5										188	3,5	2,23	90
WWT				1,2		4,4	7,89	39,1										117	2,5	0,81	10	
							1,04	0,24										0,05	0,60	0,50	0,87	keine Auffälligkeit
WVU-4	A		4,9	5	1,50	1,52	7,75	8,37	13,3	15,1	9,4	9,7							0,38	0,42	0	
	B		12	14	3,33	3,68	7,43	7,52	21,2	24,1	23,7	27,8								0,33	0,34	100
	P min/max				1,05		0,76	2,02	0,13	0,14	0,30	0,37								0,08	0,10	kalkablagerungen
Keine Auffälligkeiten, hatten bei zwei unserer Betriebsführungen Wasserumstellungen, die aber nach ein paar Anfangsverschlechterungen (Trübungen, mikrob. Auffälligkeiten) nun problemlos funktionieren.																						
WVU-5	A		3,8	4,9	1,0	1,55	8,0	8,3	7,0	8,5	8	15,0	0,2	0,7					0,37	0,36	0	
	B		23,4	24,4	6,6	6,7	17,4	16,6	70,7	66,5	8	66,7	1,6	1,6	0,8	1,2	0,50	0,51	0	0	100	
	P min/max				2,38	2,84	1,48	2,61	0,8	0,92	0,77	0,95	0,45	0,70					0,18	0,18	keine Auffälligkeit	
	Zugabe von Korrosionsinhibitoren, Anpassung der Wasserbereitung von Wasser B, damit dieses zu Wasser A kompatibel wird																					
	C		3,8	4,9	1,0	1,55	8,0	8,3	7,0	8,5	8	15,0	0,2	0,7						0,37	0,36	0
P min/max		8,2	10,6	2,5	3,0	7,4	8,0	20,7	41,4	9,8	24,6	0,9	1,0	0,8	1,2	0,32	0,37	0,57	0,57	0		
					0,59	1,27	0,00	2,14	0,20	0,54	0,12	0,36	0,10	0,40					0,06	0,24	keine Auffälligkeit	
WVU-6	Präventive Zugabe Phosphat (ortho/poly)-Silikat-kombination nach korrosionsschemischen Versuchen Dr. Böhrer TZW Dresden																					
	Wir mischen in einer Versorgungszone weiches Wasser eines Werkes mit hartem Wasser eines anderen Werkes. Mischung je nach Verbrauchsituation im Netz und/oder behälter. Keine Korrosionsprobleme trotz unterschiedlicher Ausgangslagen. In einer weiteren Zone haben wir von hartem Wasser eines Werkes auf weiches Wasser aus einem anderen Werk umgestellt. Präventive Dosierung Phosphat/Silikatkombi 6 Monate vorher und danach sukzessive Reduzierung der Dosiermenge bis auf Null. Wir haben allerdings das schwächere W in Werk mit bis hydrocarbonat von 5 ° auf circa 8 ° dH Karbonathärte aufgearbeitet, so dass der Unterschied zum vorherigen harten Wasser mit etwa 10,5 °dh nicht mehr so groß war. Keinerlei Probleme nach Außerbetriebnahme der Dosierung.																					
WVU-7	A		8,4	6,1	6,2	1,78	1,83	7,74	8,32	16,5	18,5	20,1	21,9	0,85	1,20	0,041	0,046	0,50	0,54	0	100	
	B		5,2	7,7	8,3	2,90	2,75	7,52	7,67	26,2	27,5	18,7	33,7	1,9	2,3	0,209	0,231	0,49	0,54	0	100	
	P min/max		0,47			0,32	0,54	0,52	1,54	0,15	0,14	0,03	0,20	0,53	0,55	0,45	0,46	0,01			keine Auffälligkeit	
WVU-8	A		22		6,05		7,36		24		27		0,3		<0,03				0,21		60	
	B		9		2,57		7,8		7,9		34		1,1		0,06				0,36		40	
	P max				1,55	0,00	1,06		0,27		0,11		0,40						0,26		keine Auffälligkeit	
	C		20		7,13		7,27		7,9		25		0,4		<0,08				0,21		30	
	A		9		2,57		7,8		7,9		34		1,1		<0,003				0,36		70	
	P max				1,95	0,00	1,26		0,28		0,05		0,35						0,26		keine Auffälligkeit	
	D		24		6,24		7,36		7,8		44		33		0,8		<0,03		0,31		30	
A		9		2,57		7,8		7,9		34		1,1		<0,003				0,36		70		
P max				1,63	0,00	1,06		0,55		0,02		0,15						0,08		keine Auffälligkeit		
WVU-9	A		10	13	15,5	4,0	7,55	7,62	35	50	53	65,0	0,9	1,2	1,8					0	100	
	B		9	24	26	4,5	5,1	7,25	7,43	170	210	96	125,7	3,8	1,2	1,8					0	
	P min/max		0,12			0,45	0,47	0,71	0,45	1,61	1,82	0,49	0,61	1,00	1,45	0,00	0,00				Entinkung	
Entinkung an Zählern, jedoch nicht flächendeckend, sondern vereinzelt.																						
Zugabe von Phosphat, deshalb in beiden Wassern Phosphatkonzentrationen bis 1,8 mg/l. Erfahrungswerte seit 1994, überprüft an der kupferkristallinischen in Hausinstallationen.																						
Wenn möglich sollte man sich auf die wirklich relevanten Parameter beschränken. Aus Erfahrung sehen auch Mischwasser außerhalb des Bemessungsmassstabes keine Probleme im Netz zu machen.																						
Bislangigen Wert für Chlorid im Werk B wegen derzeit noch keinen anderen Aufwertungen, soll aber in dem Messprogramm im Netz demnächst näher untersucht werden.																						
WVU-10	Fa		8,8	18,6	19,1	3,2	3,6	7,1	7,1	7,51	47	78	147	132	3,2	4	0,015	0,02	1,38	1,33	0	
	Te		10,6	14,5	15,4	3,5	3,74	7,3	7,8	43	56	85	99	4,3	5,3	0,06	0,08	0,86	0,98	0		
	Bee		9,9	15,8	17,3	3,95	4,26	7,4	7,7	56	63	86	102	2,8	3,1	0,019	0,029	0,86	0,92	0		
	Sto		11	13,5	15,2	3,8	4,1	7,3	7,7	36	43	52	67	4,7	5,5	0,04	0,04	0,56	0,64	0		
	Tie		10,5	19,8	21,9	4,5	5,1	7,3	7,6	83	99	135	150	3,5	4,5	0,02	0,02	1,15	1,17	0		
	Wuh		10,4	21,6	22,9	4,7	4,9	7,2	7,8	48	52	149	173	4,2	4,5	0,01	0,04	0,95	1,04	0		
	Kau		8	18,4	19,6	4,3	4,5	7,2	7,6	44	52	95	108	2	2,7	0,01	0,01	0,75	0,83	0		
	Kla		9,9	14,7	16,8	3,6	4,2	7,4	7,7	41	56	85	128	3	3,7	0,02	0,03	0,82	1,02	0		
	Spe		9,8	14,3	15,3	3,7	4	7,3	7,8	35	62	57	73	4,3	5,5	0,01	0,01	0,59	0,82	0		
	P max					0,85		1,66		0,82		1,33		1,75		0,34		0,86			keine Auffälligkeit	

Es wurde von einem WVU explizit über „Anfangsschwierigkeiten“ aufgrund tatsächlich kurzzeitig aufgetretener erhöhter Trübungsgehalte und einer erhöhten Eisenabgabe im Netzwasser durch die Wasserumstellung auf sehr weiches Fernwasser berichtet. Eine Auswertung der zur Verfügung gestellten Daten zeigt Abbildung 4.4. Demnach trat die Trübungserhöhung nur wenige Wochen auf und stabilisierte sich danach wieder auf einem sehr geringen Niveau.

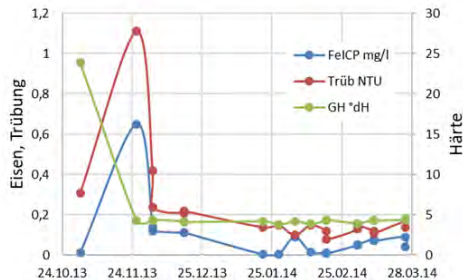


Abbildung 4.4: Auswirkung einer Mischwasserbereitstellung nach Zumischen von weichem Fremdwasser (Quelle: WVU-10)

Nach den Praxiserfahrungen treten bei der Wasserumstellung und Verringerung der Gesamt- und Karbonathärte keine Auffälligkeiten durch Trübungserhöhungen im Netzwasser auf, sofern das weichere Wasser mit dem entsprechend dem Kalkkohensäuregleichgewicht höheren pH-Wert eingespeist wird. Um Rostwasserprobleme insbesondere bei alten und groß dimensionierten Trinkwasser-Installationen zu vermeiden, sollte der Wasseraustausch im Versorgungsbereich möglichst zügig erfolgen. Zudem sollte ein Maßnahmenplan erstellt werden, um ggf. bei der Wasserumstellung eintretende Störungen gezielt minimieren zu können. Beispielsweise können aufbereitungstechnisch vorbeugende Maßnahmen, gezielte Netzspülungen sowie die zeitbegrenzte Zugabe von Inhibitoren zielführend sein.

Ein Beispiel eines Trübungsverlaufs während der Umstellung auf eine Härteverringering von 21 °dH auf 8 °dH durch die Inbetriebnahme einer Umkehrosmoseanlage zentral im Wasserwerk zeigt Abbildung 4.5. Demnach war im vorliegenden Fall kein signifikanter Trübungsanstieg während und nach der Härteumstellung aufgetreten. Zur Netzstabilisierung wurde im vorliegenden Fall bei der Umstellung vorsorglich der pH-Wert auf > 8 angehoben, die Verbraucher wurden zudem aufgefordert, zum Zeitpunkt der Umstellung für einen hinreichenden Wasseraustausch in der Trinkwasser-Installation zu sorgen.

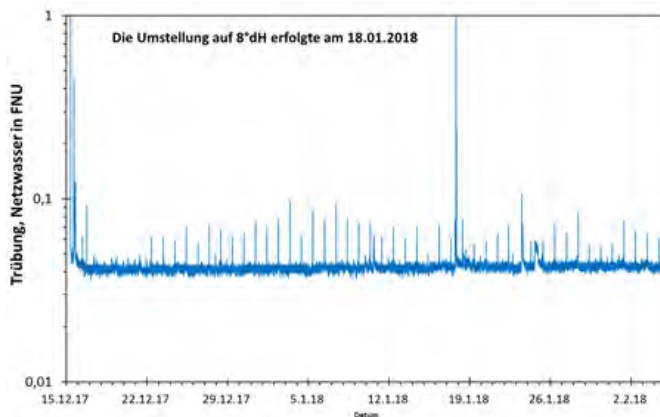


Abbildung 4.5: Trübungsverlauf während einer Umstellung auf zentral enthärtetes Trinkwasser (Quelle: TZW)

Eine weitere zielführende Maßnahme zur Minimierung von korrosionschemischen Problemen zeigt Abbildung 4.6, wobei die Wasserumstellung stufenweise durch die zentrale Enthärtung (Schnellentcarbonisierung) eines harten, neutralsalzhaltigen Trinkwassers erfolgte. Diese stufenweise Veränderung der Wasserbeschaffenheit in einem Abstand von ca. 6 Monaten wurde durch praxisnahe Untersuchungen im Prüfstand begleitet, wobei sich die Veränderungen innerhalb des Verteilungsnetzes in sehr guter Übereinstimmung mit den Prüfstanduntersuchungen abbilden ließen.

Der Übergang zur Einstellung eines Hydrogencarbonatgehaltes von 2,2 mmol/L, gleichbedeutend mit einem Anstieg des Anionenquotienten S_1 auf 1,44, bewirkte sowohl im Verteilungsnetz als auch in den Prüfstanduntersuchungen eine Zunahme der Eisengehalte im Wasser sowie entsprechende Trübungen im Versorgungsnetz. Die Begrenzung der Entcarbonisierung auf einen Ziel-Hydrogencarbonatgehalt von 2,5 mmol/L hat bis heute zu einem störungsfreien Betrieb ohne Trübungserscheinungen durch Rostwasser trotz eines großen Anteils von Gussrohren im Netz geführt.

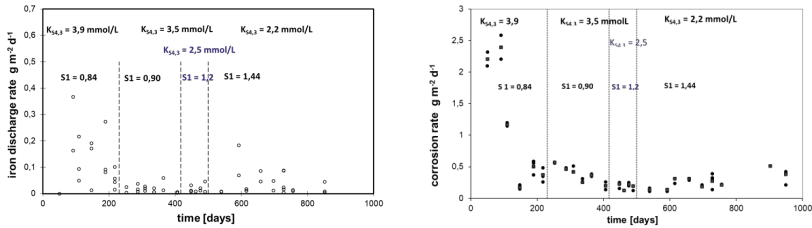


Abbildung 4.6: Erhöhung der Korrosions- und Eisenabgaberrate bei zentraler Enthärtung bei einem neutral-salzhaltigen Trinkwasser (Quelle IWW)

Ein weiteres Anwendungsbeispiel sind die Arbeiten von Sontheimer et al., die im Zuge der Mischbarkeit von unterschiedlich beschaffenen Eigenwässern aus korrosionschemischen Gründen die Enthärtungsmaßnahmen auf einen Mindest-Hydrogencarbonatgehalt begrenzen mussten [70].

Die beabsichtigte Bestandsaufnahme bei den befragten WVU vor Ort musste durch die coronabedingten Reise- und Kontakteinschränkungen entfallen. Ergänzende Informationen wurden weitestgehend telefonisch eingeholt. Hierbei wurde großes Interesse an einer Teilnahme und einem Erfahrungsaustausch in Form eines Workshops bekundet.

Die Durchführung des Workshops musste jedoch aufgrund der aktuell hohen Hygieneanforderungen zurückgestellt werden. Von einer rein webbasierten Veranstaltung wurde abgesehen, da der zum Erfahrungsaustausch erforderliche intensive Informationsaustausch nicht zu gewährleisten ist. Es ist beabsichtigt, diesen fachlichen Informationsaustausch nachzuholen.

4.2 W 216 - Bewertungsparameter

Die Ergebnisse der Literaturrecherche und die Auswertungen von Labor- und Praxisdaten lassen erkennen, dass die in der aktuellen Fassung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 angegebenen Bewertungsparameter Säurekapazität bis pH 4,3, Chlorid, Sulfat, Anionenquotient, Sauerstoff, TOC, Phosphat aus korrosionschemischer Sicht für Eisenwerkstoffe die entscheidungsrelevanten Messgrößen darstellen. Diese Parameter sind unter Berücksichtigung einiger werkstoffspezifischer Nuancen für Kupfer und Kupferwerkstoffe ebenfalls anwendbar. Ferner wird in der aktuellen Fassung des Arbeitsblattes bei der Mischung von Trinkwasser die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich des Parameters Calcitlösekapazität gefordert. Im Folgenden werden die recherchierten Hintergründe und Erkenntnisse zur Festlegung der mischwasserrelevanten Parameterwerte dargestellt.

4.2.1 Chlorid, Sulfat

In den siebziger Jahren wurden im Bremer Stadtnetz durch Madsen korrosionschemische Untersuchungen vor dem Hintergrund von zeitweise auftretenden Rostwasserproblemen durchgeführt [71]. Nach den Ergebnissen in Abbildung 4.7 nahmen die Eisengehalte im Stadtnetzwasser signifikant zu, sofern der Chloridgehalt auf mehr als 100 mg/L zugenommen hatte. Die höchsten Eisengehalte wurden insbesondere dann festgestellt, wenn gleichzeitig die geringsten pH-Werte vorlagen.

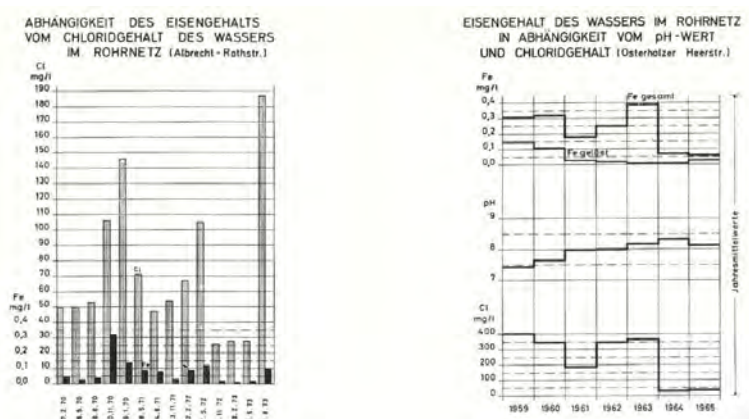


Abbildung 4.7: Einfluss von Chlorid und pH-Wert auf den Eisengehalt im Netzwasser [71]

Untersuchungen aus den achtziger Jahren haben aufzeigen können, dass die Eisenabgaberate bei unlegierten Eisenwerkstoffen neben Chlorid auch durch die Zugabe von Sulfat beeinflusst wird [50]. Aus der Darstellung der Messwerte in Abbildung 4.8 führen nach der Versuchsdauer von ca. zwei bis neun Monaten hohe Ladungsäquivalente durch Zusatz von Chlorid und Sulfat zu entsprechend hohe Eisenabgaberraten. Hierbei ist es unerheblich, ob dem Prüfwasser entweder ein Chlorid- oder Sulfat-Salz zugegeben wurde.

Bei den Messkurven fällt auf, dass Konzentrationsänderungen bei der geringen Chlorid-, Sulfat-Ausgangskonzentration deutlich geringe Auswirkungen auf die Eisenabgabe haben als bei hohen Ausgangskonzentrationen. Diese Beobachtungen stehen im Widerspruch zur Bandbreitendarstellung im DVGW-Arbeitsblatt W 216, bei denen bei geringeren Ausgangskonzentrationen von höheren Auswirkungen ausgegangen wird.

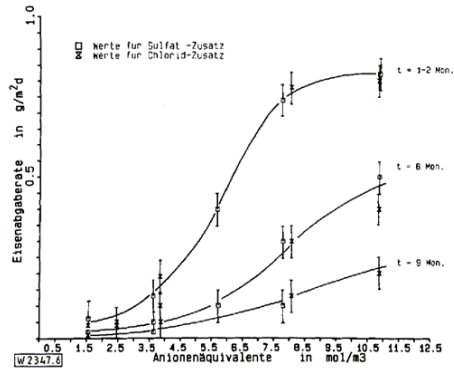


Abbildung 4.8: Einfluss von Chlorid bzw. Sulfat auf die Eisenabgabe von unlegierten Eisenwerkstoffen bei einem gut gepufferten Trinkwasser ($m = 5 \text{ mmol/L}$) und nach unterschiedlicher Laufzeit [50]

Untersuchungen von Kuron et al. aus den siebziger Jahren in Abbildung 4.9 zeigen ferner die deutliche Zunahme der Eisenabgabe insbesondere bei den höheren Gehalten von Chlorid und Sulfat [72]; [73]. Dies ist auch im Konsens zur DIN 50930-5. Demnach sind möglichst Chloridgehalte im Mischwasser von $> 5 \text{ mmol/L}$ und Sulfatgehalte von $> 3 \text{ mmol/L}$ hinsichtlich der Ausbildung einer korrosionschemisch ungünstigen, heterogenen Deckschicht zu vermeiden.

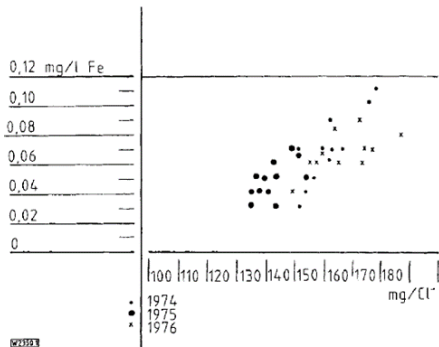


Abbildung 4.9: Zusammenhang zwischen der Chlorid-Konzentration und des Eisengehaltes im Amsterdamer Netzwasser [72]

Allen Untersuchungen gemeinsam ist die Tatsache, dass aufgrund der Untersuchungsmethode oder der fehlenden direkten Vergleichsmöglichkeiten eine eindeutige Aussage zum tatsächlichen Neutralsalzeinfluss auf das Korrosionsverhalten von Eisenwerkstoffen nicht ohne

weiteres zu treffen ist. Dabei stellt sich für die konkrete Vergleichbarkeit die Problematik, dass Veränderungen des Neutralsalzgehaltes parallel weitere Veränderungen im Wasser – beispielsweise der Pufferung und des pH-Wertes – verursachen, die einen erheblichen Einfluss auf das gesamte Korrosionsverhalten besitzen können [50].

Dies ist die Problematik, wodurch sich prinzipiell die Frage stellt, ab welchem Schwellenwert ein tatsächlich mischwasserkritischer Zustand erreicht ist, der die begrenzte Mischbarkeit der Ausgangswässer begründet.

Das Dilemma der großen Streuung von experimentell gewonnenen Daten und die dabei vorliegenden unterschiedlichen Randbedingungen im Hinblick auf die Interpretation der Korrosionsrelevanz lässt sich am Beispiel in Abbildung 4.10 erkennen. Es werden bei den Untersuchungen einerseits unterschiedliche Messmethoden (z.B. Konzentration, Abgaberate, Deckschichtanteil, Flächenabgabe) zur Beschreibung der Korrosion eingesetzt, andererseits werden explizit unterschiedliche Versuchsbedingungen, beispielsweise pH-Wert, Calcium- und Carbonatgehalt verfolgt, so dass ein Vergleich der experimentellen und der in der Praxis gewonnenen Daten unmöglich erscheint.

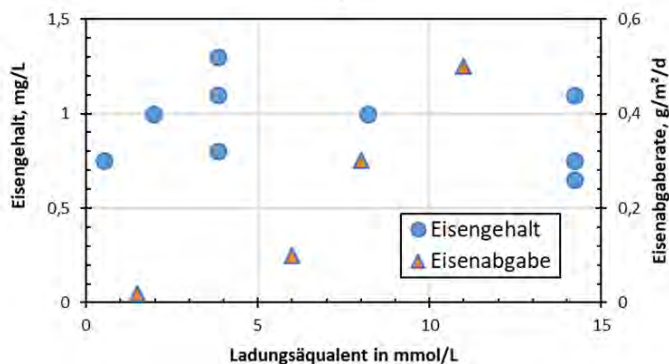


Abbildung 4.10: Versuchsergebnisse zum Eisengehalt [74] bzw. zur Eisenabgabe [50] bei ungeschützten Eisenwerkstoffen, bei unterschiedlicher Neutralsalzkonzentration (Ladungsäquivalente) und unterschiedlichen pH-Werten

Konkret wird allerdings mit der logarithmischen Beschreibung der Parameterskalen im DVGW-Arbeitsblatt W 216 der allgemeine Trend der recherchierten Daten nicht richtig wiedergegeben. Die Wahrscheinlichkeit von korrosionschemischen Problemen bei der Mischwasserbildung ist demnach eher im höheren Konzentrationsbereich und nicht innerhalb des geringen Konzentrationsbereichs zu erwarten. Die numerische Beschreibung der Parameterskalen mittels einer Exponentialfunktion wäre für die Einzelparameter Chlorid und Sulfat treffender, wie

die rote gestrichelte Linie in Abbildung 4.11 schematisch hervorhebt. Jedoch ist der Kurvenverlauf letztendlich schwierig auszurichten, da neben der Sulfat- und Chlorid-Konzentration eben eine Vielzahl von weiteren Faktoren das Korrosionsausmaß beeinflussen. Hierzu gehört die Abhängigkeit der Wirkung von Chlorid und Sulfat von der Pufferung des Wassers.

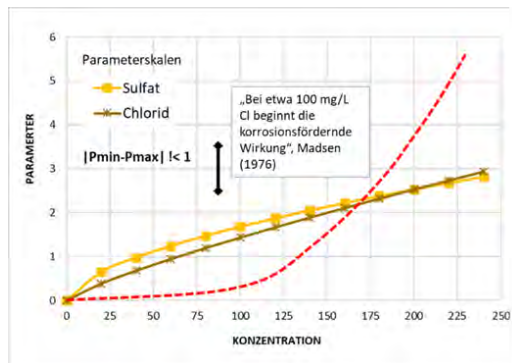


Abbildung 4.11: Logarithmische und exponentielle Beschreibung der Korrosionswahrscheinlichkeit am Beispiel der Veränderung der Neutralsalzgehalte (DVGW W 216)

Abbildung 4.12 zeigt die Auswirkungen einer Veränderung der Wasserbeschaffenheit durch Zunahme des Salzgehaltes auf die Eisenabgaberate von Stahlrohren. Demnach wird im Praxisfall langfristig von einer Beeinträchtigung der Wasserbeschaffenheit durch Trübung und Braunfärbung zu rechnen sein. Diese korrosionschemischen Probleme traten bei den Experimenten jedoch nicht auf, wenn das neutralsalzhaltige Wasser gegen neutralsalzarmes Wasser austauscht wurde [75].

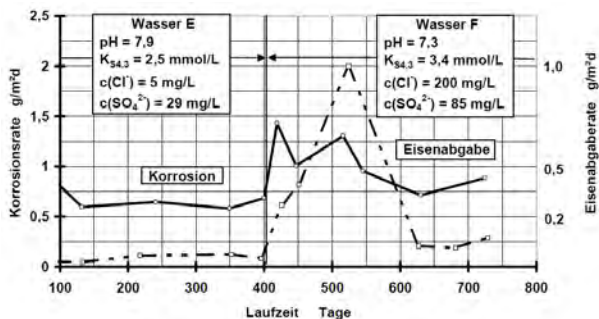


Abbildung 4.12: Auswirkung einer Änderung des Neutralsalzgehaltes auf die Korrosion von Stahlrohren [75]

4.2.2 Nitrat

Bei Ringsäulenversuchen konnte gemäß Abbildung 4.13 aufgezeigt werden, dass Nitrat offensichtlich keine korrosionsrelevanten Auswirkungen auf unlegierte Eisenwerkstoffe hat und die Anwesenheit von höheren Nitratgehalten korrosionschemisch eher unkritisch ist [50]. Eine größere Rolle spielt der Nitratgehalt bei der selektiven Korrosion von verzinkten Eisenwerkstoffen, die zu Zinkgeriesel führt. Allerdings spielen diese Rohre in der Trinkwasser-Installation mittlerweile eine untergeordnete Rolle und werden heutzutage vorzugsweise nur noch zur Reparatur eingesetzt. Aus diesem Grund und aus den genannten ressourcenbedingten Gründen wird Nitrat seit der letzten Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 (August 2004) nicht mehr zur Mischwasserbetrachtung herangezogen, zumal für Nitrat der Grenzwert der Trinkwasserverordnung eingehalten werden muss.

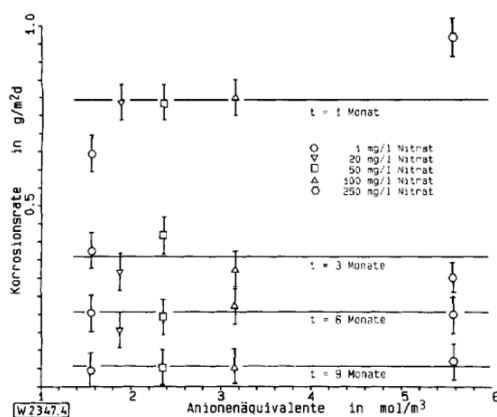


Abbildung 4.13: Korrosionsraten (Eisen) bei unterschiedlichen Nitratgehalten und Versuchslaufzeiten [50]

4.2.3 Anionenquotient

Versuche zur Neutralsalzkonzentration und Pufferung zeigen, dass das molare Verhältnis als Anionenquotient $[(c(\text{Cl}^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})) / K_{\text{S}4,3}]$ die Eisenabgabe signifikant beeinflusst. Neutralsalze sind eher bei der Ausbildung guter und schützender Deckschichten hinderlich, während Bikarbonat die Bildung schützender Deckschichten begünstigt. Zu hohe Bikarbonat-Werte sollten vermieden werden, da diese zu niedrigeren pH-Werten führen und die Metalllöslichkeit aufgrund der Bildung von Karbonatkomplexen erhöhen können [76]

Bei den Arbeiten von Larson (1957) wurde bis zu einem Anionenquotienten von 0,8 kein Anstieg der Korrosionsraten festgestellt. Bei einem Wert von $> 1,2$ hingegen traten zunehmend hohe Korrosionsraten auf [45]. Versuche von Wagner et al. in Abbildung 4.14 beschreiben im linken Diagramm eine stark zunehmende Eisenabgabe, sofern der Anionenquotient den Wert von ca. 0,5 übersteigt, und zwar unabhängig von der Pufferung der Wässer [50]. Dieser Wert wird auch in der DIN 50930, Teil 3 als Schwellenwert angegeben, unter dem keine korrosionschemischen Probleme mehr zu erwarten sind.

Die Festlegung der zulässigen Schwankungsbereite anhand der logarithmischen Beschreibung der Parameterskala gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 216 in Abbildung 4.14 lässt hingegen die größeren korrosionschemischen Probleme im eher unkritischen Bereich des Anionenkoeffizienten von < 1 erwarten. Eine Verschiebung der logarithmischen Beschreibung um 0,5 Werteinheiten auf der Abszisse würde eher den experimentell gewonnenen Daten entsprechen.

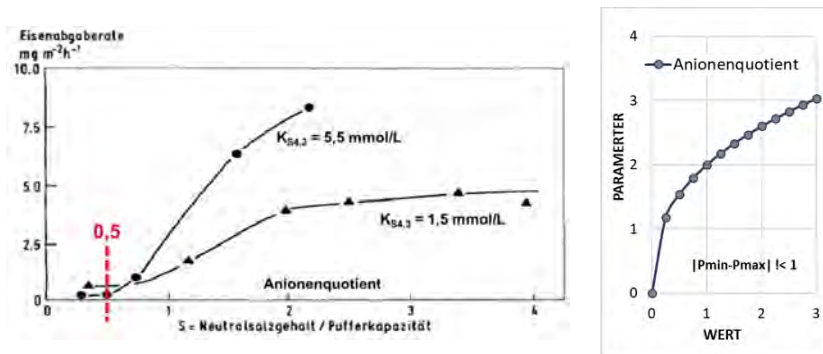


Abbildung 4.14: Einfluss des Quotienten Neutralsalzgehalt und Pufferkapazität auf die Eisenabgabe [73]; [50]; [4]

4.2.4 Sauerstoff

Die Anwesenheit von Sauerstoff spielt bei der Korrosion insbesondere bei unlegierten Eisenwerkstoffen eine bedeutende Rolle. Anhand der Laborexperimente in Abbildung 4.15 treten hohe Eisenabgaben insbesondere bei Sauerstoffgehalten von $< 2 \text{ mg/L}$ auf. Ab der Sauerstoffkonzentration von 3 mg/L wird ein stabileres Korrosionsniveau erreicht. Diese Ergebnisse spiegeln sich im Prinzip in der logarithmischen Parameterskalendarstellung im DVGW-Arbeitsblatt W 216 wider (rechtes Diagramm, Abbildung 4.15).

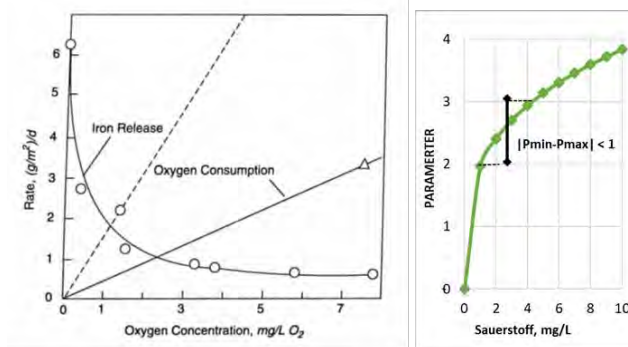


Abbildung 4.15: Einfluss des Sauerstoffgehaltes auf die Eisenabgabe [73]; [4]

Die vorliegenden Praxiserfahrungen zeigen allerdings ein heterogenes Bild. Es treten aufgrund von Praxiserfahrungen insbesondere Rostwasserprobleme bei Sauerstoffgehalten im Größenbereich von 1 bis 2 mg/L bzw. bei größeren Schwankungsbreiten zwischen 3 und 1 mg/L auf. Konstant niedrige Sauerstoffkonzentrationen von < 1 mg/L sind wiederum korrosionschemisch eher unkritisch [77]. Der Sonderfall einer mittelgroßen Stadt zeigt, dass im Trinkwassernetz erfolgreich Korrosionsprobleme vermieden werden, sofern ein Trinkwasser mit einem Sauerstoffgehalt von < 1 mg/L bereitgestellt wird. Bei den konstant niedrigen Sauerstoffkonzentrationen ist davon auszugehen, dass die Korrosionsraten nicht durch Hemmung des Sauerstoff-Transportkoeffizienten, wie dies bei der Ausbildung kompakter, gut schützender Deckschichten der Fall ist, bestimmt werden, sondern durch die Konzentration des Sauerstoffes. In diesem Fall bilden sich keine Deckschichten auf der Oberfläche aus.

Ein weiteres Praxisbeispiel in Abbildung 4.16 lässt erkennen, dass ein Rostwasserproblem vorliegt, sofern das Netzwasser einen Sauerstoffgehalt von 1 bis 1,5 mg/L aufweist. Wurde werkseitig die Sauerstoffkonzentration deutlich erhöht, so konnte bereits nach wenigen Tagen die Eisenabgabe im Netz signifikant verringert werden.

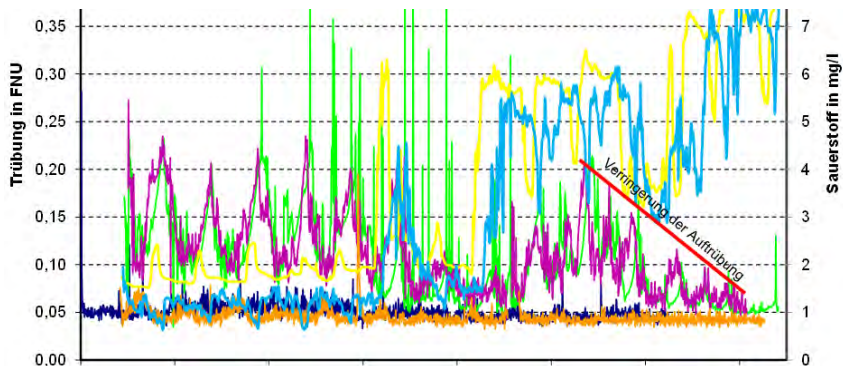


Abbildung 4.16: Trübung- und Sauerstoffmessungen an den Messpunkten Wasserwerksgang und verschiedenen Netzbereichen (TZW)

Anhand von experimentellen Arbeiten in den siebziger und achtziger Jahren wurde von der Arbeitsgemeinschaft Korrosion (1990) zudem festgestellt, dass durch hohe Korrosionsraten der Korrosionsangriff infolge einer entsprechend hohen Sauerstoffzehrung und damit Verringerung der Sauerstoffkonzentration in der Deckschicht verstärkt werden kann. Unter diesen Bedingungen sind zusätzliche erhöhte Eisenabgaben zu erwarten, wie sie von Kuch (1985) als „instationäre Korrosion“ beschrieben werden [24].

Entsprechend den vorliegenden Praxiserfahrungen sollte bei der Mischung von Trinkwässern der korrosionskritische Sauerstoffkonzentrationsbereich von 1 bis 3 mg/L vermieden werden. Wie in Abbildung 4.17 farblich markiert wäre der für die Mischung korrosionskritische Sauerstoffkonzentrationsbereich bei der Parameterskalendarstellung im DVGW-Arbeitsblatt W 216 folglich herauszunehmen.

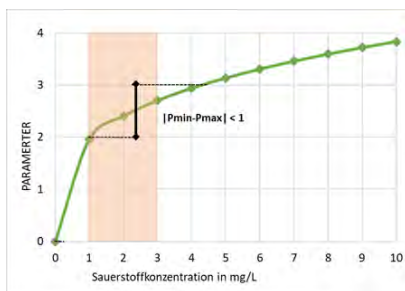


Abbildung 4.17: Parameterdarstellung mit Berücksichtigung des korrosionskritischen Sauerstoffkonzentrationsbereiches

4.2.5 Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

Insbesondere seit den Untersuchungen von Tillmans wird davon ausgegangen, dass korrosionschemische Vorgänge durch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht mitbestimmt werden. Hintergrund für diese Auffassung ist die Entwicklung der Kalk-Rostschuttschicht-Theorie, die davon ausgeht, dass eine Schuttschichtbildung durch die Einlagerung und Verkittung von Eisenoxidschichten mit abgeschiedenem CaCO_3 bewirkt wird. Untersuchungen von Gussrohren nach jahrzehntelangem Betrieb aus dem Rohrnetz oder aus dem Versuchsanlagenbetrieb zeigen, dass Eisendeckschichten mit Schutzfunktion nur ca. 3 bis 5 % Calcit enthalten. Höhere Calcitanteile wirken dagegen korrosionschemisch gesehen ungünstig, da die deutliche Zunahme von Calcit in der Deckschicht zu einer Zunahme der Porosität führt.

Dies ist kein prinzipieller Widerspruch zu den Aussagen von Tillmans, da die Einlagerung von Calcit an die Pufferung des Wassers gekoppelt ist und gut schützende Deckschichten vorzugsweise in neutralsalzarmen, mittelharten bis harten gut gepufferten Wässern gebildet werden. Die Abnahme der Pufferung des Wassers, wie sie z.B. bei einer chemischen Enthärtung und Entcarbonisierung des Wassers erfolgt, führt – je nach resultierender Wasserbeschaffenheit – im Bereich der Werkstoffoberfläche zu einer mehr oder weniger deutlichen Wandalkalisierung, da der pH-Wert im Bereich der Werkstoffoberfläche nicht oder nur noch in einem gewissen Umfang konstant gehalten werden kann. Eine höhere Pufferungsintensität wirkt einer örtlichen Anreicherung von sauren Korrosionsprodukten und damit einer Stabilisierung von Anoden entgegen.

Ein weiterer Aspekt der positiven Auswirkungen der Einlagerung gewisser Mengen von Calciumcarbonat in die Eisendeckschicht besteht darin, dass hierdurch aktive Zentren der Kathode blockiert werden können, was zu einer Vergleichmäßigung der gebildeten Deckschicht führt.

Allerdings wird heute der Begriff der „Kalk-Rost-Schuttschicht“ nicht mehr verwendet [25].

Sofern freie, kalkaggressive Kohlensäure im Wasser vorliegt, sind folglich bei eisenbasierten Leitungen auch hohe Korrosionsraten zu erwarten. Die Ergebnisse aus Laborversuchen in Abbildung 4.18 stellen den Zusammenhang des Kohlensäuregehaltes und pH-Wertes und der Karbonathärte auf die Eisenabgabe dar. Korrosionschemisch günstig sind demnach möglichst geringe Kohlensäuregehalte und entsprechend hohe pH-Werte. Die Zumischung beispielsweise von kohlensäurehaltigem Wasser mit einem geringen pH-Wert führt stets zu einer erhöhten Eisenabgabe bzw. höheren Korrosionswahrscheinlichkeit.

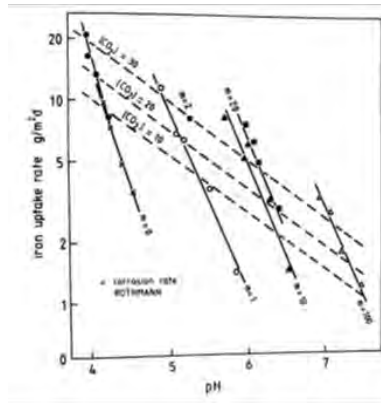


Abbildung 4.18: Auswirkung von pH-Wert, Karbonathärte (m) und Kohlensäuregehalt (CO_2) auf die Eisenabgabe [73]

Ein Praxisbeispiel zu den Auswirkungen einer pH-Wertänderung auf die Eisenabgabe zeigen die Ergebnisse der Versuche aus dem Forschungsprogramm des FE-KKs, die von Nissing publiziert wurden [75]. Die Untersuchungen wurden mit unlegierten Stahlrohren durchgeführt, die von unterschiedlichen Wässern durchflossen wurden (Abbildung 4.19). Hierbei ist eine deutliche Zunahme der Korrosionsrate bzw. der Eisenabgaberate festzustellen, wenn das Stahlrohr zunächst mit einem entsäuerten Wasser mit hohem pH-Wert durchflossen wurde (Wasser B) und dann mit einem nicht entsäuerten, deutlich calcitlösenden Wasser (Wasser A) mit entsprechend geringerem pH-Wert durchströmt wird. Wurde der pH-Wert anschließend wieder erhöht (nicht dargestellt) hat die Eisenabgabe wieder abgenommen.

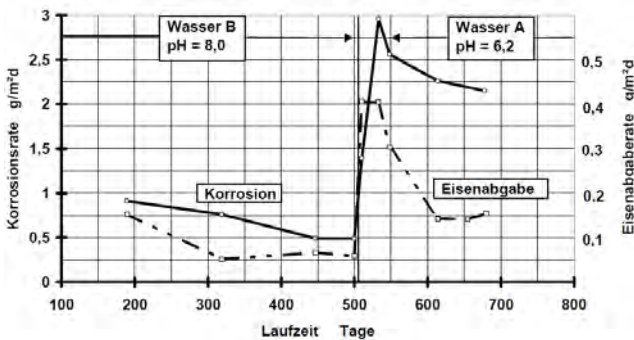


Abbildung 4.19: Auswirkung einer Änderung des pH-Wertes auf die Korrosion von Stahlrohren [75]

Bei einem Wechsel eines weichen, gering gepufferten Wassers auf ein besser gepuffertes Wasser in den Laborversuchen in Abbildung 4.20 nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit und die Eisenabgaberate etwa um den Faktor 2 zunächst signifikant zu. Die Werte gehen in Folge zurück und erreichen nach kurzer Zeit mit dem weniger gepufferten Wasser ein geringes Wertniveau. Wurde das Rohr vorher mit dem stärker gepufferten Wasser und dann mit dem wenig gepufferten Wasser beaufschlagt, nahm die Korrosionsrate lediglich nur kurzzeitig zu.

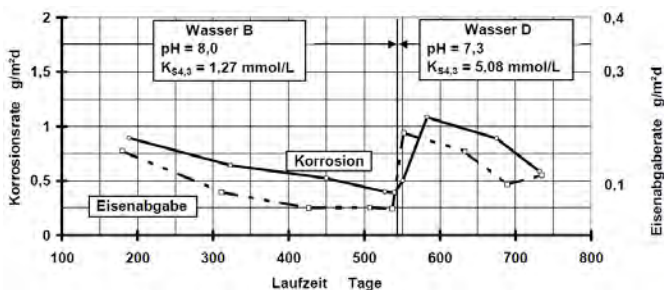


Abbildung 4.20: Auswirkung einer Veränderung der Pufferung und des pH-Wertes auf die Korrosion von Stahlrohren [75]

Auch im Falle der Kupfer-Installation kann man die Abhängigkeit des Korrosionsverhaltens der Kupferrohre von den Parametern des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes, insbesondere pH-Wert und Kohlensäure, erkennen. Abbildung 4.21 zeigt die Entwicklung der Kupferkonzentration nach Inbetriebnahme einer zentralen Enthärtung (Schnellentcarbonisierung); der pH-Wert wurde um ca. 0,5 pH-Einheiten angehoben (pH 7,0 auf pH 7,5; die Basekapazität bis pH 8,2 von 1 mmol/L auf 0,06 mmol/L verringert). Die Entsäuerung des Wassers führt hier, unabhängig von der Vorgeschichte der Kupferrohre (in der Referenzanlage wurden die Rohre über ca. 1 Jahr im harten Wasser gealtert), zu einem signifikanten Rückgang der Kupferlöslichkeit, was gleichbedeutend mit einem deutlichen Rückgang der Korrosionsgeschwindigkeit ist. Die Kupferkonzentrationen liegen sowohl bei sofortiger Inbetriebnahme der Rohre im enthärteten Wasser, als auch nach Umstellung vom harten auf das weichere Wasser in der gleichen Größenordnung und sind in diesem Fall wasserseitig und unter gleichen Betriebsbedingungen nur abhängig vom pH-Wert und der Basekapazität bis pH 8,2.

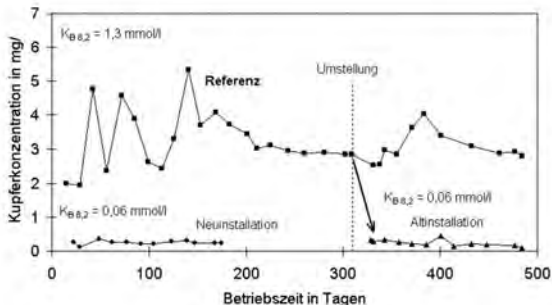


Abbildung 4.21: Einfluss der pH-Wert-Anhebung und Entsäuerung eines harten, neutralsalzreichen Trinkwassers durch zentrale Enthärtung auf die Kupferlöslichkeit (Quelle: IWW)

Calcitlösende Wässer sind prinzipiell korrosionschemisch als kritisch zu betrachten. Bei der Mischung von Wässern, die sich im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht als Gleichgewichtswässer entsprechend der Tillmans-Darstellung in Abbildung 4.22 auf der Gleichgewichtskurve befinden, wird u.U. ein korrosionsrelevantes calcitlösendes Wasser resultieren. Sofern die Gleichgewichtswässer weitestgehend die gleiche Karbonathärte (m-Wert, $K_{S4,3}$) aufweisen, wird bei deren Mischung kein calcitlösendes Wasser gebildet. Weichen die Hydrogencarbonatgehalte jedoch entsprechend Abbildung 4.22 voneinander deutlich ab, resultiert ein Mischwasser, das eine entsprechend starke calcitlösende Eigenschaft aufweist und möglicherweise somit die gesetzlichen Vorgaben an Trinkwasser nicht erfüllt.

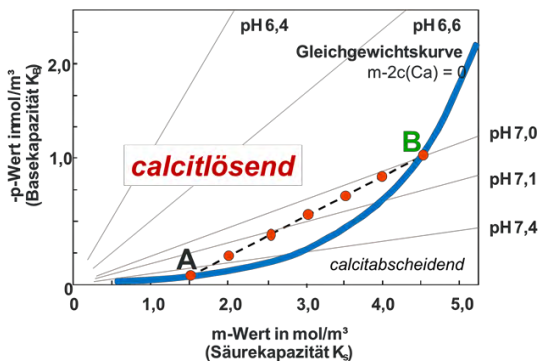


Abbildung 4.22: Mischung von unterschiedlich karbonathaltigen Wässern, die jeweils im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befinden (in Anlehnung an Nissing, 2004) [78]

Das DVGW-Arbeitsblatt W 216 gibt in Anlehnung an die Tillmans-Kurve für den Parameterwert Säurekapazität die zulässigen Schwankungsbreiten vor, wonach die gesetzlichen Vorgaben an den Parameterwert Calcitlösekapazität eingehalten sind. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Ausgangswässer sich weitestgehend im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befinden ($D_C < 5 \text{ mg/L}_{\text{CaCO}_3}$), um bei einer dezentralen Einspeisung die Forderung von $D_C < 10 \text{ mg/L}_{\text{CaCO}_3}$ im Mischwasser zu erfüllen. Sofern eine zentrale Einspeisung des Mischwassers in das Verteilungsnetz erfolgen soll, ist im Mischwasser ein D_C -Wert von $< 5 \text{ mg/L}_{\text{CaCO}_3}$ einzuhalten.

In Abbildung 4.23 sind in der rechten Zahlenspalte tabellarisch die Werte für die Calcitlösekapazität ($D_{C_{\text{max}}}$) aufgeführt, die sich bei der Mischung von Gleichgewichtswässern ($m\text{-}2c(\text{Ca})=0$) mit unterschiedlichen $K_{S_{4,3}}$ -Gehalten jedoch bei gleichem Schwankungsbereich von $|P_{\text{min}} - P_{\text{max}}| = 1$ rechnerisch ergeben. Bei den D_C -Werten in der rechten Zahlenspalte fällt auf, dass diese bei den geringen $K_{S_{4,3}}$ -Gehalten weitestgehend den Gleichgewichtsbereich anzeigen, jedoch bei den höheren $K_{S_{4,3}}$ -Gehalten in der Mischung D_C -Werte von $> 5 \text{ mg/L}_{\text{CaCO}_3}$ aufweisen. Bei den höheren $K_{S_{4,3}}$ -Gehalten werden folglich u.U. im Mischwasser die gesetzlichen Anforderungen bei einer zentralen Einspeisung des Mischwassers nicht eingehalten.

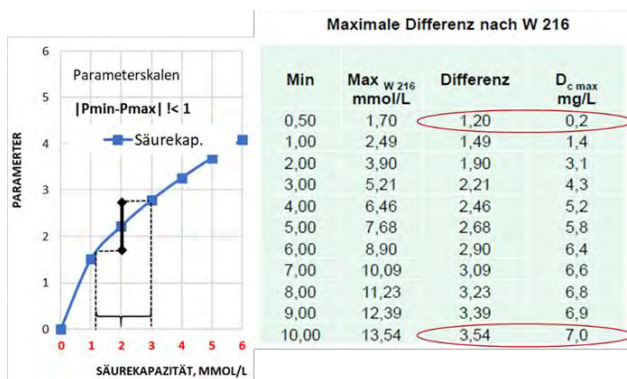


Abbildung 4.23: Zulässige Schwankungsbreite für $K_{S_{4,3}}$ gemäß DVGW Arbeitsblatt W 216 und Calcitlösekapazität für $|P_{\text{min}} - P_{\text{max}}| = 1$ (CAS-Berechnungen, K. Johannsen, 2020) [79]

Nach dem Berechnungsergebnis von Johannsen (2020) sind prinzipiell $K_{S_{4,3}}$ -Gehaltsunterschiede bei Gleichgewichtswässern von $> 2,4 \text{ mmol/L}$ möglich, um im Mischwasser den D_C -Wert von 5 mg/L einzuhalten. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die molaren Calciumgehalte die Hälfte des $K_{S_{4,3}}$ -Ausgangswertes entsprechen.

Sofern die Calciumgehalte der Ausgangswässer sich um weniger als 1 mmol/L unterscheiden, sind noch $K_{S_{4,3}}$ -Unterschiede von mindestens $2,5 \text{ mmol/L}$ zur Einhaltung des D_C -Wertes von

5 mg/L möglich. Bei Calciumgehaltsunterschieden von 1,5 mmol/L liegen die möglichen $K_{S4,3}$ -Schwankungsbreiten bei 2 mmol/L. Nach den Berechnungsergebnissen könnten somit die Vorgaben im DVGW-Arbeitsblatt W 216 hinsichtlich der Säurekapazität bis pH 4,3 präzisiert und vereinfacht werden (Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3: Mögliche $K_{S4,3}$ -Schwankungsbreite von Gleichgewichtswässern zur Einhaltung des D_c -Wertes von max. 5 mg/L $CaCO_3$ im Mischwasser bei unterschiedlichen Calciumausganggehalten (CAS-Berechnungen, K. Johannsen, 2020) [79]

Wasser A	$\Delta Ca \approx K_{S4,3}/2$		$\Delta Ca = 1,5 \text{ mmol/L}$		$\Delta Ca = 1,0 \text{ mmol/L}$	
	$ P_{\min}-P_{\max} $	$D_{c \max}$	$ P_{\min}-P_{\max} $	$D_{c \max}$	$ P_{\min}-P_{\max} $	$D_{c \max}$
mmol/L	mmol/L	mg/L $CaCO_3$	mmol/L	mg/L $CaCO_3$	mmol/L	mg/L $CaCO_3$
0,25	3,1	5	2,0	3,4	2,5	4,8
2,5	2,4	5	2,0	4,5	2,5	4,8
4	2,5	5	2,0	4,6	2,5	4,8
8	2,8	5	2,0	4,0	2,5	4,1

4.2.6 TOC

Bei der Mischwasserbewertung anhand des Parameters gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (TOC) werden durch das DVGW-Arbeitsblattes W 216 zulässige Schwankungsbreiten von 2,5 mg/L vorgegeben, unabhängig von den TOC-Ausganggehalten.

Arbeiten von Rudek et al. (1979) zeigen in Abbildung 4.24, dass neben der TOC-Konzentration die TOC-Zusammensetzung offensichtlich die Korrosion und Deckschichtbildung beeinflussen können [80]. So bewirken Zugaben von Huminstoffen eine geringe Eisenabgaberrate bei ungeschützten Stahlrohren. Eine vergleichsweise hohe Pufferung wirkt sich hierbei günstig auf die Deckschichtausbildung aus.

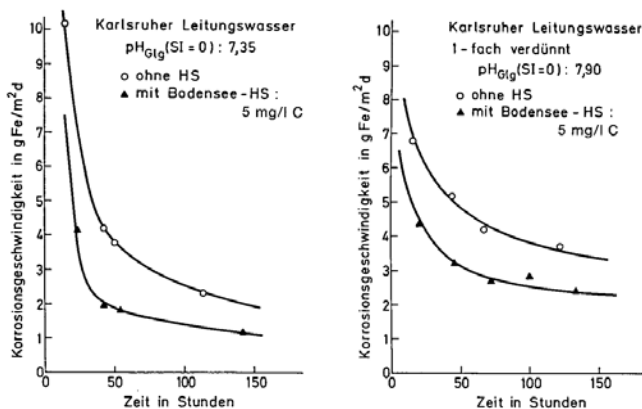


Abbildung 4.24: Abhängigkeit der Korrosionsgeschwindigkeit von der Pufferkapazität und Huminstoff-Zusatz [80]

Bei verzinkten Eisenwerkstoffen zeigen Versuche von Werner (1976) in Abbildung 4.25, dass bei hohen Huminstoff-Zugaben ebenfalls Korrosion verringert wurde. Hierbei zeigten im Laborversuch stärker polare TOC-Zusätze die größere Korrosionsinhibierung.

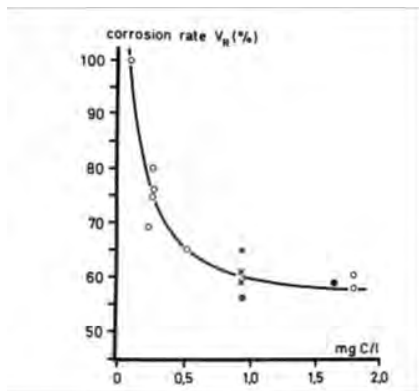


Abbildung 4.25: Auswirkungen von Huminstoff-Zugaben auf die Korrosion von verzinkten Eisenwerkstoffen [81]

Die TOC-Zusammensetzung spielt bei der Deckschichtbildung eine Rolle und wird bei der Darstellung der zulässigen Schwankungsbreite im DVGW Arbeitsblatt W 216 bislang nicht berücksichtigt. Nach den vorliegenden Praxiserfahrungen muss nicht zwangsweise die Mischung von unterschiedlichen huminstoffhaltigen Grundwässern zu Korrosionsproblemen führen. So

wurde bei der Umfrage von keinen Auffälligkeiten auch bei der Überschreitung der TOC-Schwankungsbreite berichtet. Es ist folglich hinsichtlich der Mischwasserbewertung zu hinterfragen, inwiefern die Schwankungsbreite für den Parameter TOC auf den Wert von 2,5 mg/L als zulässig festzulegen ist.

4.2.7 Phosphat

Zu den Auswirkungen von Phosphatzusätzen auf die Korrosion und auf deren mögliche Inhibierung gibt es eine große Anzahl wissenschaftlicher Abhandlungen. Im DVGW-Arbeitsblatt W 216 wird die zur Bewertung der Mischbarkeit zulässige Schwankungsbreite numerisch in der logarithmischen Darstellung vorgegeben, wie in Abbildung 4.26 dargestellt. Dementsprechend werden bei geringen Phosphatausgangsgelalten vergleichsweise geringe Konzentrationsunterschiede bei den Ausgangswässern zulässig, während bei hohen Ausgangsgelalten höhere Schwankungen möglich sind. Korrosionschemisch eher kritisch sind Schwankungen bei geringen Phosphatkonzentrationskonzentrationen von < 1 mg/L PO_4 , wie dies auch bei der Parameterskalendarstellung in DVGW-Arbeitsblatt W 216 berücksichtigt ist.

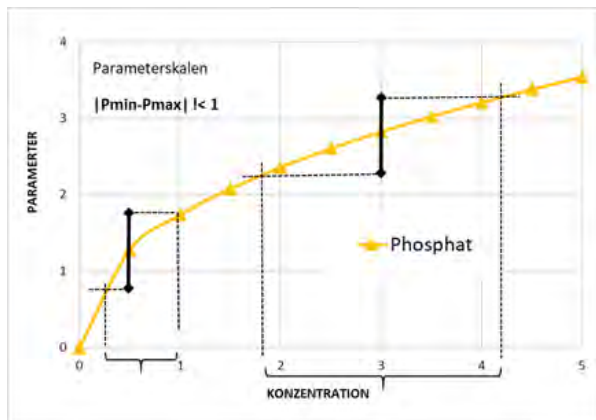


Abbildung 4.26: Zulässige Schwankungsbreite von Phosphat gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 216

Aus mikrobiologischer Sicht und zur Vermeidung von Aufkeimungen sollten möglichst geringe Phosphatgehalte in Trinkwässern angestrebt werden, was offensichtlich bei der logarithmischen Darstellungsweise im DVGW-Arbeitsblatt zum Ausdruck kommt.

Abbildung 4.27 zeigt die Wirksamkeit von Inhibitoren auf die Kupferkonzentration nach Stagnation. Zunächst ist festzuhalten, dass alle hier getesteten Inhibitoren teilweise signifikant die Kupferkonzentration im Stagnationswasser verringern.

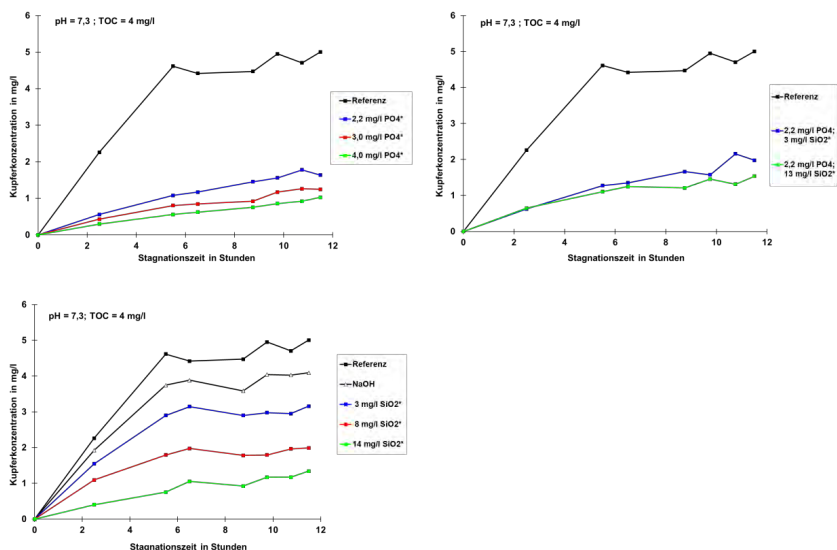


Abbildung 4.27: Auswirkungen von Inhibitoren unterschiedlicher Zusammensetzung und Konzentration auf die Kupferkonzentration (Quelle: IWW)

Betrachtet man die Effizienz der Inhibitoren im Vergleich zur Referenzanlage, so wird folgendes deutlich:

- Minimierungsgebot: Bei der vorliegenden Wasserbeschaffenheit ist die Dosierung von ca. 2 mg/L PO₄ ausreichend. Die höhere Konzentration von 4 mg/L führt nicht zu einer signifikanten weiteren Verringerung der Kupferkonzentration.
- Der Einsatz eines phosphatbasierten Silikat-Inhibitors bringt im vorliegenden Fall keine Vorteile, da hierdurch die Phosphatkonzentration im Produkt nicht verringert werden kann. Die Effizienz ist in der gleichen Größenordnung wie beim Einsatz des reinen Phosphatproduktes.
- Die Wirksamkeit des reinen Silikat-Inhibitors ist deutlich abhängig von der eingesetzten Konzentration.

Dieses Beispiel zeigt die Notwendigkeit eines Wirksamkeitsnachweises, d.h. die Art und Konzentration des Inhibitors im Vorfeld zu testen.

Als weitere Bedingung für eine ausreichende Korrosionsschutzwirkung ist zu berücksichtigen, dass Inhibitoren an der Deckschichtbildung und den Prozessen des Auf- und Abbaus beteiligt sind. Es besteht somit ein Gleichgewicht zwischen der Deckschicht und der Inhibitorkonzentration im Wasser, so dass Inhibitoren kontinuierlich zudosiert werden müssen. Das Einstellen der Dosierung oder eine Unterdosierung führen dazu, dass sich die Inhibitorbestandteile wieder aus der Deckschicht lösen.

Diese Situation ist in Abbildung 4.28 für die wasserwerksseitige Dosierung eines Phosphat-Inhibitors dargestellt. Die Einstellung der Dosierung führt zum sofortigen Wiederanstieg der Eisenkonzentration im Wasser.

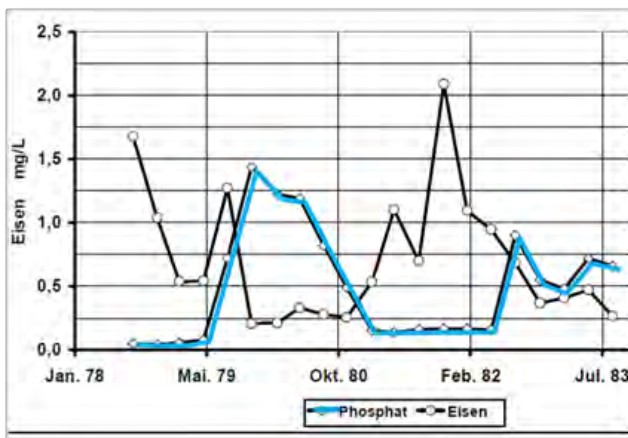


Abbildung 4.28: Einfluss des Abschaltens der Inhibitor-Dosierung auf die Eisenkonzentration im Rohrnetz [78]

5 Schlussfolgerung

Das DVGW-Arbeitsblatt W 216 „Versorgung mit unterschiedlichen Trinkwässern“ gibt Kriterien für die Bewertung der Mischbarkeit von Trinkwässern vor, um eventuelle Nachteile bei der Mischung solcher Wässer für die Wasserversorgungsanlagen sowie für die Abnehmer zu vermeiden.

Hierbei wird die Mischbarkeit mittels der Konzentrationsunterschiede der Ausgangswässer beurteilt. Die Mischung von Trinkwässern gleicher Beschaffenheit wird aus korrosionschemischer Sicht als unkritisch bewertet, sofern die zulässigen Schwankungsbreiten der korrosionsrelevanten Parameter der Ausgangswässer eingehalten sind.

Die derzeitige Fassung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 (2004) zieht sieben Parameter (Chlorid, TOC, Phosphat, Säurekapazität bis pH 4,3 ($K_{S4,3}$), Sauerstoff, Sulfat und Anionenquotient aus den Parametern Chlorid, Sulfat und Säurekapazität ($K_{S4,3}$) für die Bewertung hinzu.

In der Praxis ist in den meisten Fällen der Parameter $K_{S4,3}$ das entscheidungsrelevante Kriterium, das die Mischbarkeit von Trinkwässern begrenzt. So zeigt auch Abbildung 5.1 die Mischungskritische Relevanz der Säurekapazität bis pH 4,3 und im Regelfall der Gesamthärte bei den für 25 WVU durchgeführten Mischwasserberechnungen gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 216.

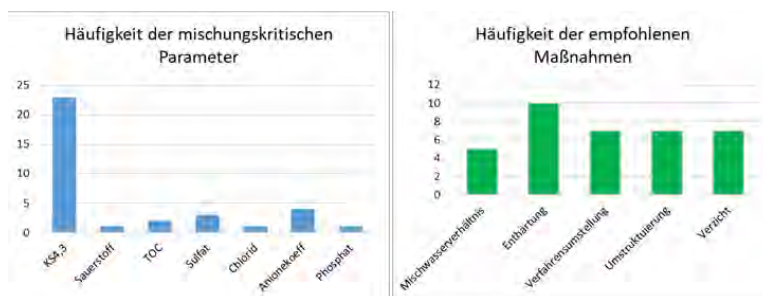


Abbildung 5.1: Häufigkeit der Mischungskritischen Einzelparameter und der empfohlenen Maßnahmen bei der Mischwasserberechnung bei 25 Anwendungsfällen

Bei der Befragung von 100 ausgewählten Wasserversorgern wurde von keinen korrosionschemischen Auffälligkeiten bei der Mischung ihrer Trinkwässer berichtet. Die Vorgaben des DVGW-Arbeitsblattes W 216 werden weitestgehend befolgt. Bei mischwasserrelevanten Abweichungen werden seitens der Versorger entsprechende Maßnahmen wie bspw. durch eine zentrale Entsäuerung oder Zugabe von Inhibitoren getroffen. Auch in den Fällen, bei denen

die zulässigen Schwankungsbreiten bei einzelnen Bewertungsparametern nicht eingehalten werden, sind keine relevanten Korrosionsprobleme bekannt. Die Vorgaben des DVGW-Arbeitsblattes W 216 scheinen demnach sehr konservativ ausgelegt zu sein.

Laut den Angaben der befragten WVU werden im Regelfall die kalkkohlendioxidgleichgewichtsrelevanten Vorgaben im Mischwasser eingehalten. Die hierbei zulässige Schwankungsbreite wird im DVGW-Arbeitsblatt W 216 durch den Parameter Säurekapazität ($K_{S4,3}$) vorgegeben und wurde offensichtlich aus der Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtsdarstellung gemäß Tillmans abgeleitet.

Demgegenüber erscheint eine Mischwasserbewertung durch die sechs weiteren korrosionsrelevanten Parameter des DVGW-Arbeitsblattes W 216 schwierig und nicht hinreichend genau durch die vorgegebenen Parameterskalen darstellbar. Zum einen werden die möglichen korrosionschemischen Auswirkungen von Konzentrationsunterschieden unterschiedlich interpretiert. Zum anderen wird die Korrosionswahrscheinlichkeit von vielen Faktoren beeinflusst, so dass eine korrosionschemische Bewertung sehr komplex erscheint und mittels der Parameterskalen entsprechend unscharf ist.

Es ist daher zu hinterfragen, inwiefern die im DVGW-Arbeitsblatt W 216 vorgegebene konkrete Begrenzung der zulässigen Konzentrationsunterschiede bei den Ausgangswässern die tatsächliche korrosionschemische Mischbarkeit hinreichend genau wieder gibt. Möglicherweise sind weniger scharfe Begrenzungen in der Praxis zielführender, da weitere Faktoren die Korrosion beeinflussen und folglich zu einem unzutreffenden Interpretationsergebnis führen können.

Bei der Festlegung der Mischbarkeit könnte konkret auf die Vorgaben der aktuell gültigen Korrosionsnormen, Regelwerke bzw. gesetzlichen Verordnungen zurückgegriffen werden. Ferner könnte auf die allgemeinen korrosionschemischen Zusammenhänge hingewiesen werden, die bei der Mischwasserbewertung zu berücksichtigen sind. Beispielsweise wäre darauf hinzuweisen, dass mit Zunahme des Neutralsalzgehaltes tendenziell die Korrosionswahrscheinlichkeit im Mischwasser zunimmt. Die durch die Mischung resultierenden netzspezifischen Auswirkungen könnten durch geeignete Betriebsmessungen erfasst werden, um im Bedarfsfall beispielsweise durch Festlegung des Mischungsverhältnisses konkret reagieren zu können.

Auf der anderen Seite sind mit der Angabe der Bandbreiten zwar teilweise deutliche Unschärfen verbunden, allerdings ermöglicht diese Methode eine weitgehende Vergleichbarkeit in der Bewertung, die bei einem ausschließlichen Verweis auf korrosionschemische Sachzusammenhänge nicht gegeben wäre. Erfahrungsgemäß wäre damit der Interpretationsspielraum relativ groß.

6 Empfehlungen

Eine konzeptionelle Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 erscheint nach dem Ergebnis des vorliegenden DVGW-Forschungsvorhabens GÜW216 gegeben. Demnach ergeben sich für eine Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 (2004) folgende Empfehlungen:

6.1 Grundlegendes

Die in der aktuellen Fassung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 vorgegebenen Beurteilungsparameter stellen die wesentlichen korrosionschemisch relevanten Messgrößen dar und sind daher zur Mischwasserbewertung geeignet. Die Mischwasserbewertung durch die Festlegung der zulässigen Schwankungsbreiten bei Ausgangswässern ist für den Parameter $K_{S4,3}$ möglich, da die im Mischwasser zu erwartenden Kalkkohlenensäure-Gleichgewichtsbedingungen hinreichend genau dargestellt bzw. vorausberechnet werden können. Für die weiteren in der aktuellen Fassung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 vorgegebenen Parameter erscheint jedoch die Festlegung der Mischbarkeit bzw. der ggf. erforderlichen Maßnahmen durch die zulässige Schwankungsbreite von den Ausgangswässern weniger zielführend.

Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Parameter sind Prognosen von korrosionschemischen Auswirkungen bei der Mischung von Trinkwässern anhand der exakt werbetbasierenden Vorgaben schier unmöglich, wengleich sich die Festlegungen des W 216 (Parameterauswahl und Bewertungsmaß) in der Praxis bewährt haben. Daher sollte bei der Mischwasserbewertung beispielsweise eher konkret auf die Vorgaben der Trinkwasserverordnung und der weiteren bewährten korrosionschemischen Vorgaben bspw. der Normung zurückgegriffen werden. Es erscheint zudem hilfreich, prägnant auf die wesentlichen korrosionschemischen Zusammenhänge der einzelnen relevanten Parameter bzw. Faktoren hinzuweisen.

6.1.1 Säurekapazität

Die bei der Mischung resultierende calcitlösende Eigenschaft des Mischwassers kann durch Kalk-Kohlenensäure-Gleichgewichtsberechnungen von den Ausgangswässern zur Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben hinreichend genau bestimmt werden. Die in der aktuellen Fassung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 vorgegebenen zulässigen Schwankungsbreiten hingegen führen bei geringen bzw. bei hohen Karbonat-Ausganggehalten zu Fehlinterpretationen. Daher sollte bei der Festlegung der ggf. erforderlichen Maßnahmen der Rechenweg vorgezogen werden.

Alternativ zur Bandbreitendarstellung bietet sich die folgende Vereinfachung für die Mischwasserbewertung an: Sofern die Ausgangswässer den Anforderungen der TrinkwV hinsichtlich des Parameterwertes Calcitlösekapazität (D_c) entsprechen, werden im Mischwasser bei einer

Differenz der $K_{S4,3}$ -Werte von $< 1,5$ mmol/L die Anforderungen an den Dc-Wert prinzipiell erfüllt. In allen anderen Fällen ist eine individuelle Berechnung erforderlich.

6.1.2 Sulfat, Chlorid, Anionenquotient

Die Festlegung der Mischbarkeit und der ggf. erforderlichen Maßnahmen anhand von zulässigen Schwankungsbreiten der Ausgangswässer für die Parameter Chlorid, Sulfat und Anionenquotient kann zu mischwasserbeschränkenden Fehlinterpretationen führen. Die Mischwasserbetrachtung und die Festlegung der Mischungskriterien sollten sich vorzugsweise an den Vorgaben der DIN EN 12502 orientieren. Tabelle 6.1 zeigt eine Übersicht der für die Bewertung zur Verfügung stehenden Vorgaben durch die bestehende Normung für gängige Leitungswerkstoffe.

Tabelle 6.1: Übersicht über mischwasserrelevante Korrosionskriterien der DIN EN 12502

	DIN EN 12502-2 Kupfer und Kupferlegierungen	DIN EN 12502-3 schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe	DIN EN 12502-4 nichtrostende Stähle	DIN EN 12502-5 Gusseisen und niedriglegierte Stähle
geringe Wahrscheinlichkeit für Lochkorrosion	Kaltwasser: $c(\text{HCO}_3^-)$, $c(\text{Cl}^-)$ hoch $c(\text{SO}_4^{2-})$, $c(\text{NO}_3^-)$ niedrig	S1 < 0,5 (bei S1 > 3 sehr wahrscheinlich)	Kaltwasser: $c(\text{Cl}^-) < 6,0$ mmol/L	$c(\text{HCO}_3^-)$ hoch
	Warmwasser: S3 > 1,5 nur problematisch falls pH < 7 und $c(\text{HCO}_3^-) < 1,5$ mmol/L	inhibierend wirken: $c(\text{HCO}_3^-) > 2,0$ mmol/L und $c(\text{Ca}^{2+}) > 0,5$ mmol/L	Warmwasser: $c(\text{Cl}^-) < 1,5$ mmol/L nur bestimmte nicht- rostende Stähle sind problematisch	$c(\text{Cl}^-)$, $c(\text{SO}_4^{2-})$, $c(\text{NO}_3^-)$ niedrig
		„Zinkgeriesel“		
geringe Wahr- scheinlichkeit für selektive Korrosion	Entzinkung von Messing	S2 < 1 oder S2 > 3		
	$c(\text{HCO}_3^-)$ hoch $\frac{c(\text{Cl}^-)}{c(\text{HCO}_3^-)}$ klein	Günstig ist: $c(\text{NO}_3^-) < 20$ mg/L		
	$S_1 = \frac{c(\text{NO}_3^-) + c(\text{Cl}^-) + 2 \cdot c(\text{SO}_4^{2-})}{c(\text{HCO}_3^-)}$	$S_2 = \frac{\text{Cl}^- + 2 \cdot \text{SO}_4^{2-}}{\text{NO}_3^-}$	$S_3 = \frac{c(\text{HCO}_3^-)}{\text{SO}_4^{2-}}$	(Parameter in molarer Konzentration)

Anmerkung: Die in Tabelle 6.1 angegebenen Kennwerte für die Bewertung von Lochkorrosion von Kupfer entsprechen nicht mehr den Erfahrungen aus der Praxis. Schadensanalysen zeigen, dass Schäden in Wässern auftreten, die signifikant außerhalb des Bewertungsmaßstabes der Norm liegen und deutlich höhere S_3 -Werte aufweisen. Bei den in der Norm genannten Wässern handelt es sich ausschließlich um nicht entsäuerte Wässer, die in dieser Form nicht verteilt werden dürften. Aus diesem Grund steht der S_3 -Wert momentan in der fachlichen Diskussion und sollte in dieser Form bei der Überarbeitung entfallen.

Bei der Mischwasserbetrachtung sollte darauf hingewiesen werden, dass sich bei der Zunahme des Neutralsalzgehaltes die Korrosionswahrscheinlichkeit im Regelfall erhöht. Nach den Praxisergebnissen ist die Konzentrationssumme von Sulfat und Chlorid von < 150 mg/L im Mischwasser korrosionschemisch offensichtlich eher unproblematisch, wohingegen bei der Summenkonzentration von > 150 mg/L die Korrosionswahrscheinlichkeit zunehmend als ungünstig bewertet wird.

Chlorid und Sulfat können zudem wesentlich die Wahrscheinlichkeit der Entzinkung von Messingwerkstoffen beeinflussen. Die Erkenntnisse von Turner (1961) in der Darstellung in Abbildung 6.1 könnten bei der Mischwasserbetrachtung als Orientierungshilfe genutzt werden [82]. Der kritische Grenzbereich könnte beispielsweise im rechten Diagramm in Abbildung 6.1 inklusive einer Unschärfe von ± 10 % dargestellt werden.

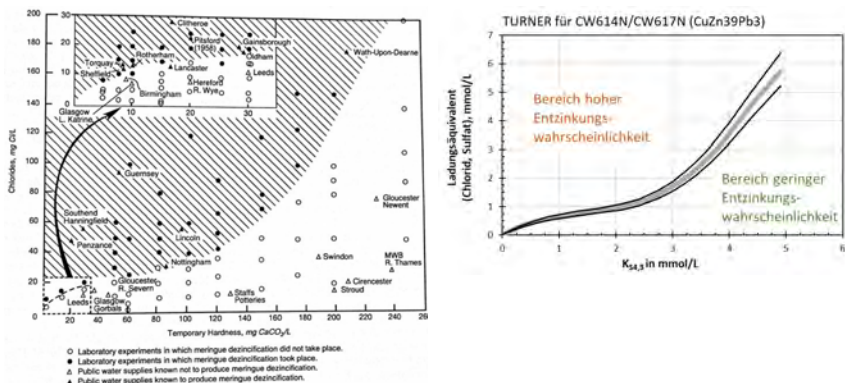


Abbildung 6.1 Entzinkungswahrscheinlichkeit von Messing in Abhängigkeit des Karbonatgehaltes und der Chlorid-Konzentration [82] bzw. unter Berücksichtigung des Sulfatgehaltes [83]

6.1.3 Sauerstoff

Nach den vorliegenden Erfahrungen sollte in korrosionschemischer Hinsicht die Sauerstoffkonzentration im Mischwasser unabhängig vom Mischungsanteil möglichst den Wert von 3 mg/L nicht unterschreiten. Die Sauerstoffkonzentration von < 1 mg/L im Trinkwasser ist ein Sonderfall und sollte bei einer Zumischung unterschritten bleiben, um korrosionschemische Probleme zu vermeiden.

Die in der aktuellen Fassung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 vorgegebene Parameterskala sollte überarbeitet werden, wobei der sauerstoffkritische Konzentrationsbereich von 1 bis 3 mg/L in der Mischung entsprechend des Netzbetriebes berücksichtigt werden sollte.

6.1.4 TOC

Die Korrosion von Leitungswerkstoffen kann zum einen durch den TOC-Gehalt, zum anderen auch durch die Stoffzusammensetzung beeinflusst werden. Letzteres wird allerdings bei der Mischwasserbewertung durch die Festlegung der zulässigen Schwankungsbreite der Ausgangswässer in der aktuellen Fassung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 nicht berücksichtigt. Die Festlegung der zulässigen Mischwasseranteile anhand der TOC-Parameterskala ist folglich zu hinterfragen.

Folgende Hinweise können bei der Mischwasserbewertung sinnvoll sein:

Entsprechend der DIN 50930-6 bzw. der Positivliste der trinkwasserhygienisch geeigneten metallenen Werkstoffe des Umweltbundesamtes sollte hinsichtlich der Kupferabgabe der TOC-Gehalt im Mischwasser den Wert von 1,5 mg/L nicht überschreiten, sofern ein pH-Wert von < 7,4 vorliegt.

Prinzipiell sollten große TOC-Schwankungen (über die angegebene Bandbreite hinaus) vorsorglich vermieden werden, um auch das Aufkeimungspotential insbesondere bei der Anwendung einer chlorbasierten Netzdesinfektion minimieren zu können. Es sollten Untersuchungen zum AOC (Summe der assimilierbaren organischen Kohlenstoffverbindungen) bzw. zum BDOC (biologisch abbaubarer gelöster organischer Kohlenstoff) erfolgen, sofern sich relative große TOC-Unterschiede beim Mischwasser ergeben.

Ggf. ist die chlorbasierte Desinfektion möglichst zu vermeiden, worauf bei einer Überarbeitung des Arbeitsblattes W 216 explizit hingewiesen werden sollte.

6.1.5 Phosphat

Phosphat wird zum Korrosionsschutz sowohl im Verteilungsnetz als auch in der Trinkwasser-Installation für metallene Rohr- und Armaturenwerkstoffe eingesetzt. Zur Gewährleistung des Korrosionsschutzes ist eine Mindestphosphatkonzentration entscheidend, die aus der Parameterskalen-Darstellung im DVGW-Arbeitsblatt W 216 nicht explizit hervorgeht.

Folglich wäre die Vorgehensweise zur Festlegung der Mischbarkeit durch die Parameterskalen-Darstellung von Phosphat zu hinterfragen. Beispielweise könnte darauf hingewiesen werden, dass hohe Phosphatgehalte sowie große Konzentrationschwankungen bei der Mischung vermieden werden sollten. Ferner wäre in diesem Zusammenhang auf das DVGW-Arbeitsblatt W 215 hinzuweisen. Bei einer Überarbeitung sollte ebenfalls berücksichtigt werden, dass sowohl Phosphat- als auch Silikat-Inhibitoren und deren Mischungen in der Praxis eingesetzt werden.

6.2 Zusätzliche Ergänzungen

Im DVGW-Arbeitsblatt W 216 könnten zusätzliche Hinweise gegeben werden, welche Maßnahmen bei einer Wasserumstellung zu empfehlen sind. Beispielsweise wäre bei einer Wasserumstellung auf ein Mischwasser mit deutlich geringerer Härte und/oder geringeren Neutralsalzgehaltes ein rascher Wasseraustausch im betreffenden gesamten Versorgungsgebiet ggf. durch gezielte Netzspülungen zu empfehlen.

Als Alternative bietet sich die stufenweise Umstellung bis zur Zielwasserbeschaffenheit an, wobei dann erfahrungsgemäß bei den Zwischenschritten ein ausreichender Zeitraum zur Einstellung des Systems Werkstoff/Trinkwasser gewährleistet sein sollte.

Das Mischwasser sollte möglichst leicht calcitabscheidend sein, um Eintrübungen durch die Mobilisierung von Kalkablagerungen zu vermeiden und auch in korrosionschemischer Hinsicht das Netz zu stabilisieren. Da die tatsächlichen Auswirkungen einer Wasserumstellung nicht in hinreichender Sicherheit prognostiziert werden kann, ist vor, während und nach der Umstellung die Erfassung der Trübung eines repräsentativen Netzbereichs zu empfehlen, um ggf. gezielte Maßnahmen durchführen zu können.

Es sollten zudem konkrete Hinweise zur Thematik des jeweiligen Rohrnetzes geben werden, da sich die vorliegende Werkstoffsituation und sich die hydraulischen Randbedingungen maß-

geblich auf die Korrosion bei einer Wassenumstellung auswirken. Sinnvoll wäre ein Maßnahmenplan bzw. eine Vorgehensweise vorzugeben, um möglichen korrosionskritischen Szenarien gezielt und erfolgreich zu begegnen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] „<https://www.dvgw.de/themen/wasser/ressourcenmanagement-und-gewaesserschutz/klimawandel-und-wasserversorgung/>,” 2020. [Online].
- [2] C. Castell-Exner und T. Zenz, „Klimawandel und Wasserversorgung,“ *Energie Wasser-Praxis*, pp. 20-23, 2010.
- [3] S. Simon, R. Schöpfer, D. Schumacher und C. Meyer, „Auswirkungen der Sommertrockenheit 2018 auf die öffentliche Wasserversorgung,“ *Energie Wasser-Praxis*, pp. 14-19, 2019.
- [4] *DVGW-Arbeitsblatt W 216:2004-08 Versorgung mit unterschiedlichen Wässern*.
- [5] T. Kluge und E. Schramm, Wassernöte. Zur Geschichte des Trinkwassers, Aachen: Kölner Volksblatt Verlag, 2. Auflage 1988.
- [6] H. Roscher, Rehabilitation von Wasserversorgungsnetzen. Strategien - Verfahren - Fallbeispiele, Berlin: HUSS-MEDIEN, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage 2008.
- [7] E. Grahn, Die Art der Wasserversorgung der Städte des Deutschen Reiches mit mehr als 5000 Einwohnern. Statistische Erhebungen, München: R. Oldenbourg, 1883.
- [8] 104. Wasserstatistik Bundesrepublik Deutschland. Berichtsjahr 1992, Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 1993.
- [9] B. Heyen, P. Maler, C. Stürtz, A. Schwigon und K. Büschel, „Netz- und Schadensstatistik Wasser - Ergebnisse aus den Jahren 2016 und 2017,“ *ewp Energie-Wasser-Praxis*, pp. 48-55, 2020.
- [10] G. Naber, Fernwasserversorgung - dargestellt unter besonderer Berücksichtigung von technisch-wissenschaftlichen Entwicklungen und Erfahrungen bei der Bodensee-Wasserversorgung, München: Oldenbourg, 1996.

- [11] W. Bischofsberger, Siedlungswasserwirtschaft im Wandel der Zeit. Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen der Technischen Universität München, Nr. 80, München: Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen der Technischen Universität München, 1987.
- [12] C. Ude, Quellen für München. Lebensart im Einklang mit Technologie und Ökologie, München: Carl Hanser, 2008.
- [13] F. Haakh, „Aktuelle Herausforderungen der Fernwasserversorgung,“ *3-R International*, pp. 42-53, 2018.
- [14] C. Heyer, Ursache und Beseitigung des Bleiangriffs durch Leitungswasser. Chemische Untersuchungen aus Anlass der Dessauer Bleivergiftungen im Jahre 1986, Dessau: Verlagsbuchhandlung Paul Baumann, 1888.
- [15] *DVGW-Arbeitsblatt W 216:1983-06 Versorgung mit unterschiedlichen Wässern.*
- [16] *DVGW-Arbeitsblatt W 601:1976-03: Versorgung mit unterschiedlichen Wässern.*
- [17] E. Mattsson und A. Frederikkson, „Pitting corrosion in copper tubes - cause of corrosion and counter-measures,“ *British Corrosion Journal* , pp. 246-257, 1968.
- [18] E. Mattsson, „Counteraction of pitting in copper wtaer pipes by bicarbonate dosing,“ *Materials and Corrosion*, pp. 499-503, 1988.
- [19] D. Harrison, D. Nicholas und G. Evans, „Pitting corrosion of copper tubes in soft drinking waters - corrosion mechanisms,“ *ACC Conference Proceedings*, 2001.
- [20] „Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe (Trinkwasserverordnung - TrinkwV),“ *BGBL, Teil 1*, p. 2612, 5.12.1990.
- [21] A. Becker, C.-L. Kruse, T. Patzelt und H. Overath, „Wasserseitige Möglichkeiten zur Reduzierung der Kupferabgabe aus Hausinstallationen in das Trinkwasser,“ *Materials and Corrosion*, pp. 89-95, 1996.
- [22] W. Kölle und H. Sontheimer, „Untersuchungen zur Schutzschichtbildung in Gussrohren,“ *Vom Wasser*, pp. 277-294, 1977.

-
- [23] H. Sontheimer, W. Kölle und V. L. Snoeyink, „The siderite model of the formation of corrosion-resistant scales,“ *Journal AWWA*, pp. 572-579, 1981.
- [24] A. Kuch, Untersuchungen zum Mechanismus der Aufeisung in Trinkwasserverteilungssystemen. Dissertation, Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1984.
- [25] H. Sontheimer, „Der "Kalk-Kohlensäure-Mythos" und die instationäre Korrosion,“ *Zeitschrift für Wasser- und Abwasser-Forschung*, pp. 219-227, 1988.
- [26] H. Gräfen und A. Rahmel, Korrosion verstehen - Korrosionsschäden vermeiden. 20 Jahre Forschungs- und Entwicklungsprogramm "Korrosion und Korrosionsschutz", Bonn: Irene Kuron, 1994.
- [27] J. Tillmanns, „Über Bestimmungsmethoden der Kohlensäure im Wasser,“ *Journal für Gasbeleuchtung und Verwandte Beleuchtungsarten sowie für Wasserversorgung (Organ des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern)*, pp. 348-351; 370-374, 1913.
- [28] J. Tillmanns, P. Hirsch und W. Weintraud, „Die Korrosion von Eisen unter Wasserleitungswasser,“ *gwf Wasser/Abwasser*, pp. 845-849; 919-925, 1927.
- [29] J. Tillmanns, P. Hirsch und W. R. Heckmann, „Der Einfluß von höheren Temperaturen und Salzzusätzen auf das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht im Wasser und die Kalk-Rost-Schutzschicht,“ *gwf Wasser/Abwasser*, pp. 1-24, 1931.
- [30] Scheelhaase, „Die Entsäuerung des Frankfurter Stadtwaldwassers,“ *Journal für Gasbeleuchtung und Verwandte Beleuchtungsarten sowie für Wasserversorgung (Organ des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern)*, pp. 822-832, 1909.
- [31] Noll, „Zur Frage der Enteisung und Wiedervereisung des Wassers,“ *Gesundheitsingenieur*, p. 22, 1917.
- [32] H. Lührig, „Über eisen- und manganauflösende Wässer, die Rolle der Kohlensäure bei dem Metallangriff und über die Bestimmung der Überschusss Kohlensäure,“ *Das Gas- und Wasserfach. Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, pp. 381-389, 1927.

- [33] U. R. Evans und E. Pietsch, *Korrosion, Passivität und Oberflächenschutz von Metallen*, Berlin: Julius Springer, 1939.
- [34] J. Tillmanns, *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1927.
- [35] Klut, *Die Untersuchung des Wassers an Ort und Stelle*, Berlin: Springer, 1922, 4. Auflage.
- [36] W. Langelier, „The Analytic Control of Anti-Corrosion Water Treatment,“ *Journal AWWA*, pp. 1500-1521, 1936.
- [37] J. W. Ryznar, „A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water,“ *Journal AWWA*, pp. 472-483, 1944.
- [38] R. F. McCauley, „Controlled deposition of protective calcite coatings in water mains,“ *Journal AWWA*, pp. 1386-1396, 1960.
- [39] J. E. Singley, „The search für a corrosion index,“ *Journal AWWA*, pp. 579-582, 1981.
- [40] S. Imram, J. Dietz, G. Mutoti, J. Taylor und A. Randall, „Modified Larsons Ration incorporating temperature, water age, and electroneutrality effect on red water release,“ *Journal of Environmental Engineering*, pp. 1514-1520, 2005.
- [41] T. Larson und R. Skold, „Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron,“ *Corrosion*, pp. 285-288, 1958.
- [42] H. Steinrath, „Die Beurteilung des korrosionschemischen Verhaltens kalter und warmer Wässer,“ *gwf Wasser/Abwasser*, pp. 140-141, 1956.
- [43] *DIN 50930:1960-12 (Vornorm): Beurteilung des korrosionschemischen Verhaltens kalter Wässer gegenüber unverzinktem und verzinktem Stahl und Eisen.*
- [44] *DIN 50930:1966-01: Beurteilung des korrosionschemischen Verhaltens kalter Wässer gegenüber unverzinktem und verzinktem Stahl und Eisen.*
- [45] T. E. Larson und R. Skold, „Current research on corrosion and tuberculation of cast iron,“ *Journal AWWA*, pp. 1429-1432, 1958.

-
- [46] DIN 50930-2:1980-12: *Korrosion der Metalle. Korrosionsverhalten von metallischen Werkstoffen gegenüber Wasser. Beurteilungsmaßstäbe für unlegierte und niedriglegierte Eisenwerkstoffe.*
- [47] DIN 50930-2:1993-02: *Korrosion der Metalle. Korrosion metallischer Werkstoffe im Innern von Rohrleitungen, Behältern u. Apparaten bei Korrosionsbelastung durch Wässer. Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit un- und niedriglegierter Eisenwerkstoffe.*
- [48] DIN 50930-6:2013-10: *Korrosion der Metalle. Korrosion metallischer Werkstoffe im Innern von Rohrleitungen, Behältern u. Apparaten bei Korrosionsbelastung durch Wässer. Bewertungsverfahren u. Anforderungen hinsichtlich der hyg. Eignung in Kontakt mit TW.*
- [49] DIN EN 12502-2005-03: *Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und -speichersystemen – Teil 5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle.*
- [50] I. Wagner, S. Gerber und A. Kuch, „Der Einfluss von Neutralsalzen auf das Korrosionsverhalten unlegierter Eisen-Werkstoffe in gut gepufferten Trinkwässern,“ *Werkstoffe und Korrosion*, pp. 64-69, 1985.
- [51] K. E. Oehler, „The use of mixed water of different origins,“ *8th IWSA-Congress, Vienna, Special Subject No. 5*, pp. H3-H16, 1969.
- [52] F. Troyano, J. Ruiz des la Torre und J. Oromi, „Mixing of water of different origin in distribution systems,“ *9th IWSA-Congress, 11-14 September, 1972, New York, Special Subject No. 4*, pp. D1-D7, 1972.
- [53] K. E. Oehler, „Die Verwendung von Mischwässern verschiedenen Ursprungs,“ *gwf wasser/Abwasser*, pp. 860-865, 1969.
- [54] J. Tillmans, P. Hirsch und K. Schilling, „Die selbsttätige Schutzschichtbildung durch kaltes Wasserleitungswasser in eisernen Rohren,“ *gwf wasser/Abwasser*, pp. 49-53, 1929.

- [55] G. Axt, „Über das Verhalten von Mischwässern in Bezug auf das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht,“ *gwf Wasser/Abwasser*, p. 998, 1965.
- [56] U. Hässelbarth, „Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht in natürlichen Wässern unter Berücksichtigung des Eigen- und Fremdelektrolyt-Einflusses,“ *gwf Wasser/Abwasser*, pp. 89-93; 157-160, 1963.
- [57] G. Axt, „Mischwässer und Kalkaggressivität,“ *Vom Wasser*, pp. 423-439, 1965.
- [58] „Versorgung mit Wässern unterschiedlicher Zusammensetzung,“ in *DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 6*, Frankfurt a. Main, ZfGW-Verlag GmbH, 1976.
- [59] S. Normann, „Möglichkeiten der Wasseraufbereitung zur Angleichung der Wasserzusammensetzung,“ in *Versorgung mit unterschiedlichen Wässern. DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 6*, Frankfurt a. Main, ZfGW-Verlag GmbH, 1976, pp. 37-41.
- [60] F. Montiel, J. Coutelan und B. Nguyen, „A new real-time drinking water network mixing model for the control and command centre of the city of Paris,“ *Water Science and Technology*, pp. 383-383, 2002.
- [61] J. Taylor, Z. Tang, W. Xiao und S. Hong, „Monitoring of Distribution Water Qualities Under Various Source Water Blending,“ *Environmental Monitoring and Assessment*, pp. 59-71, 2006.
- [62] A. Szuster–Janiaczyk und J. Bylka, „The effect of the mixing of water from different sources in the water supply system on tap water quality – a full-scale technical investigation case study,“ *Water Supply*, pp. 303-312, 2019.
- [63] L. S. McNeill und M. Edwards, „The importance of temperature in assessing iron pipe corrosion in water distribution systems,“ *Environmental Monitoring and Assessment*, pp. 229-242, 2002.
- [64] K. Oehler, „Probleme bei der Versorgung mit Wässern verschiedener Herkunft - Einführung in das Thema,“ in *Versorgung mit Wässern unterschiedlicher Beschaffenheit. DVGW-Schriftenreihe Nr. 6*, Frankfurt a. Main, ZfGW-Verlag GmbH, 1976, pp. 5-6.
- [65] *Persönliche Information von Herrn Werner Nissing. [Interview].*

-
- [66] J. F. Dye, „Correlation of the two principal methods of calculating the three kinds of alkalinity,“ *Journal AWWA*, pp. 800-820, 1958.
- [67] J. F. Dye, „The calculation of alkalinities and free carbon dioxide in water by the use of nomographs,“ *Journal AWWA*, pp. 895-900, 1944.
- [68] „Bekanntmachung der Neufassung des Wasch- und Reinigungsmittelgesetzes vom 17. Juli 2013. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 41, ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2013“.
- [69] K. Oehler, „Versorgung mit unterschiedlichen Wässern,“ *gwf wasser/Abwasser*, pp. 85-88, 1986.
- [70] DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität; AG, Energie- und Wasserwerke Rhein-Neckar Untersuchungen zur zentralen Teilenthärtung des Trinkwassers in Mannheim, Mannheim; Karlsruhe: Eigenverlag, 1978.
- [71] S. Madsen, „Mischwasserversorgung in Bremen aus der Sicht des Wasserchemikers,“ in *Versorgung mit unterschiedlichen Wässern. DVGW-Schriftenreihe Nr. 6*, Frankfurt a. Main, ZfGW-Verlag GmbH, 1976, pp. 23-30.
- [72] D. Kuron, H. Gräfen, H. Batroff und K. M. R. Fäßler, „Einfluss des Chloridgehaltes in Trinkwasser auf die Korrosion von unlegiertem Stahl,“ *Werkstoffe und Korrosion*, pp. 68-79, 1985.
- [73] A. Korrosion, „Zum Einfluss von Chlorid-Ionen auf die Korrosion von unlegiertem Stahl in Wasserversorgungsanlagen,“ *Werkstoffe und Korrosion*, pp. 129-135, 1990.
- [74] J. Hu, H. Dong, Q. Xu, W. Ling, J. Qu und Z. Qiang, „Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water swith strategy,“ *Water Research*, pp. 428-435, 2018.
- [75] W. Nissing, „Anforderungen an und Korrosivität von Trinkwässern unter besonderer Berücksichtigung der Verteilung von Mischwässern,“ in *Korrosion und Korrosionsschutz in wasserführenden Anlagen. Teil I: Trinkwasser (Korrosionum). 3. Dresdner Korrosionsschutztage 17. und 18. April 1997*, Dresden, IKS Institut für Korrosionsschutz Dresden - Eigenverlag, 1997, pp. 9-50.

- [76] *Persönliche Mitteilung von Wolfgang Werner*. [Interview]. 2020.
- [77] W. Nissing, „Zur Korrosion des Eisens in salzhaltigen, gepufferteten Wässern,“ *gwf Wasser/Abwasser*, pp. 267-271, 1976.
- [78] W. Nissing, „Stabilisierung - Praxis,“ in *DVGW Lehr- und Handbuch Wasserversorgung, Band 6*, 2004, p. 709ff.
- [79] K. Johannsen, „KKG-Berechnungen, TU Hamburg,“ 2020.
- [80] R. Rudek, R. Blankenhorn und H. Sontheimer, „Verzögerung der Eisenoxidation durch natürliche organische Wasserinhaltsstoffe und deren Auswirkung auf die Korrosion von schwarzen Stahlrohren,“ *Vom Wasser*, pp. 133-146, 1986.
- [81] G. Werner, Untersuchungen zum Korrosionsverhalten feuerverzinkter Installationsrohre in kalten Trinkwässern. Dissertation, Karlsruhe, 1976.
- [82] M. Turner, „The influence of water composition on the dezincification of duplex brass fittings,“ *Proc. Soc. Wat. Treatm.Exam*, pp. 162-174, 1961.
- [83] D. van Luyen, I. Schubert und W. Nissing, „Aramturen vor ihrem Einsatz testen. Einfluss von Neutralsalzen auf Schwermetallmigration und Korrosion (Teil 3),“ *Sanitär- und Heizungstechnik*, pp. 44-47, 2008.
- [84] B. Zietz, „Klinische Bleivergiftungen durch Trinkwasser - historische Fallhäufungen im deutschsprachigen Raum,“ in *Wichmann, H.E.; Fromme, H. (Hrsg.): Handbuch der Umweltmedizin*, Landsberg, ecomed Medizin, 2015, pp. Kap. VIII-3.1 55.
- [85] H. Glasauer und K. Arndt, „<http://www.uni-kassel.de/fb6/AEP/wakutexte/wakutexte3.pdf>,“ 0.J.. [Online]. Available: <http://www.uni-kassel.de>. [Zugriff am 20.10.2020 10 2020].
- [86] W. Nissing, „Wasserentsäuerung und Metallkorrosion,“ in *Wasserfachliche Aussprachetagung Duisburg 1974. DVGW-Schriftenreihe Nr. 7*, Frankfurt a. Main, ZfGW-Verlag GmbH, 1976, pp. 135-148.
- [87] M. Schulze und W. Schwenk, „Über den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit und der NaCl-Konzentration auf die Sauerstoffkorrosion unlegierten Stahls in Wässern,“ *Werkstoffe und Korrosion*, pp. 611-619, 1980.

[88] W. Merkel, „Auf den Spuren der Wasserversorgung,“ in *130 Jahre zentrale Wasserversorgung Erfurt. Symposium der ThüWa Thüringen Wasser GmbH, der BGW/DAVW Landesgruppen Ost und der Frontinusgesellschaft, Erfurt, Frontinus-Gesellschaft, 2006.*

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Hamburger Wassernetz 1848; die Zeichnungen stammen vermutlich von William Lindley	3
Abbildung 3.1: Mischungsdiagramme [53]	26
Abbildung 3.2: Kriterien zur Einordnung von Mischwässern in „Wässer unterschiedlicher Beschaffenheit“ auf Basis des W 601	29
Abbildung 3.3: Einfluss des Sauerstoff-Gehaltes auf die Korrosionsrate bei kontinuierlich durchflossenen Stahlrohren (Quelle: IWW).....	30
Abbildung 3.4: Einfluss der Temperaturänderung auf die Korrosionsrate von Stahlrohren ST 37, Versuchsanlagenbetrieb (Quelle: IWW)	32
Abbildung 3.5: Nomogramm-Darstellung [67] als Vorlage für das Bandbreiten-Konzept.....	36
Abbildung 4.1: Graphische Ermittlung der zulässigen Schwankungsbreite (DVGW-Arbeitsblatt W 216, August 2004)	37
Abbildung 4.2: Festlegung des zulässigen Mischungsverhältnisses hinsichtlich der Sulfat-Ausgangskonzentrationen von 30 mg/L (Ausgangswasser B) bzw. 300 mg/L (Ausgangswasser A)	38
Abbildung 4.3: Parameterskalen zur Ermittlung der zulässigen Schwankungsbreite [DVGW-Arbeitsblatt W 216, August 2004]	39
Abbildung 4.4: Auswirkung einer Mischwasserbereitstellung nach Zumischen von weichem Fremdwasser (Quelle: WVU-10).....	42
Abbildung 4.5: Trübungsverlauf während einer Umstellung auf zentral enthärtetes Trinkwasser (Quelle: TZW).....	43
Abbildung 4.6: Erhöhung der Korrosions- und Eisenabgaberate bei zentraler Enthärtung bei einem neutralsalzhaltigen Trinkwasser (Quelle IWW).....	44
Abbildung 4.7: Einfluss von Chlorid und pH-Wert auf den Eisengehalt im Netzwasser [71] ..	45
Abbildung 4.8: Einfluss von Chlorid bzw. Sulfat auf die Eisenabgabe von unlegierten Eisenwerkstoffen bei einem gut gepufferten Trinkwasser ($m = 5 \text{ mmol/L}$) und nach unterschiedlicher Laufzeit [50]	46

Abbildung 4.9: Zusammenhang zwischen der Chlorid-Konzentration und des Eisengehaltes im Amsterdamer Netzwasser [72].....	46
Abbildung 4.10: Versuchsergebnisse zum Eisengehalt [74] bzw. zur Eisenabgabe [50] bei ungeschützten Eisenwerkstoffen, bei unterschiedlicher Neutralsalzkonzentration (Ladungsäquivalente) und unterschiedlichen pH-Werten.....	47
Abbildung 4.11: Logarithmische und exponentielle Beschreibung der Korrosionswahrscheinlichkeit am Beispiel der Veränderung der Neutralsalzgehalte (DVGW W 216)	48
Abbildung 4.12: Auswirkung einer Änderung des Neutralsalzgehaltes auf die Korrosion von Stahlrohren [75].....	48
Abbildung 4.13: Korrosionsraten (Eisen) bei unterschiedlichen Nitratgehalten und Versuchslaufzeiten [50]	49
Abbildung 4.14: Einfluss des Quotienten Neutralsalzgehalt und Pufferkapazität auf die Eisenabgabe [73]; [50]; [4].....	50
Abbildung 4.15: Einfluss des Sauerstoffgehaltes auf die Eisenabgabe [73]; [4]	51
Abbildung 4.16: Trübung- und Sauerstoffmessungen an den Messpunkten Wasserwerksausgang und verschiedenen Netzbereichen (TZW).....	52
Abbildung 4.17: Parameterdarstellung mit Berücksichtigung des korrosionskritischen Sauerstoffkonzentrationsbereiches	52
Abbildung 4.18: Auswirkung von pH-Wert, Karbonathärte (m) und Kohlensäuregehalt (CO ₂) auf die Eisenabgabe [73].....	54
Abbildung 4.19: Auswirkung einer Änderung des pH-Wertes auf die Korrosion von Stahlrohren [75].....	54
Abbildung 4.20: Auswirkung einer Veränderung der Pufferung und des pH-Wertes auf die Korrosion von Stahlrohren [75].....	55
Abbildung 4.21: Einfluss der pH-Wert-Anhebung und Entsäuerung eines harten, neutralsalzreichen Trinkwassers durch zentrale Enthärtung auf die Kupferlöslichkeit (Quelle: IWW).....	56

Abbildung 4.22: Mischung von unterschiedlich karbonathaltigen Wässern, die jeweils im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befinden (in Anlehnung an Nissing, 2004) [78]	56
Abbildung 4.23: Zulässige Schwankungsbreite für $K_{S4,3}$ gemäß DVGW Arbeitsblatt W 216 und Calcitlösekapazität für $ P_{min} - P_{max} = 1$ (CAS-Berechnungen, K. Johannsen, 2020) [79].....	57
Abbildung 4.24: Abhängigkeit der Korrosionsgeschwindigkeit von der Pufferungskapazität und Huminstoff-Zusatz [80]	59
Abbildung 4.25: Auswirkungen von Huminstoff-Zugaben auf die Korrosion von verzinkten Eisenwerkstoffen [81]	59
Abbildung 4.26: Zulässige Schwankungsbreite von Phosphat gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 216.....	60
Abbildung 4.27: Auswirkungen von Inhibitoren unterschiedlicher Zusammensetzung und Konzentration auf die Kupferkonzentration (Quelle: IWW).....	61
Abbildung 4.28: Einfluss des Abschaltens der Inhibitor-Dosierung auf die Eisenkonzentration im Rohrnetz [78].....	62
Abbildung 5.1: Häufigkeit der Mischungskritischen Einzelparameter und der empfohlenen Maßnahmen bei der Mischwasserberechnung bei 25 Anwendungsfällen.....	63
Abbildung 6.1: Entzinkungswahrscheinlichkeit von Messing in Abhängigkeit des Karbonatgehaltes und der Chlorid-Konzentration [82] bzw. unter Berücksichtigung des Sulfatgehaltes [83].....	67

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Kennzahlen und Bewertung, LSI, RSI und DFI	14
Tabelle 3.2: Kennzahlen und Bewertung, Larson-Skold	15
Tabelle 3.3: Entwicklung der Forschung zum Thema Deckschichtbildung auf Gussrohren – Von der Kalk-Rostschutz-Theorie zur instationären Korrosion.....	17
Tabelle 3.4: Zusammensetzung und Eigenschaften des Wassers im Hinblick auf die Förderung der Schutzschichtbildung bei unverzinkten und verzinkten un- und niedriglegierten Eisenwerkstoffen [43]	19
Tabelle 3.5: Veränderung der zur Bewertung verwendeten Parameter unter Berücksichtigung der Überarbeitung des W 216 zur aktuellen Ausgabe 2004	34
Tabelle 4.1: Numerische Bestimmung des Bewertungsmaßes (DVGW W 216)	38
Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Umfrageergebnisse von 100 WVU (Rücklaufquote ca. 25 %).....	41
Tabelle 4.3: Mögliche $K_{S_{4,3}}$ -Schwankungsbreite von Gleichgewichtswässern zur Einhaltung des Dc-Wertes von max. 5 mg/LCaCO ₃ im Mischwasser bei unterschiedlichen Calciumausgangsgehalten (CAS-Berechnungen, K. Johannsen, 2020) [79]	58
Tabelle 6.1: Übersicht über mischwasserrelevante Korrosionskriterien der DIN EN 12502 ..	66

10 Anlagen

10.1 Fragebogen - Umfrage



TZW / IWW - Fragebogen zur Mischbarkeit von Trinkwässern mit unterschiedlicher Beschaffenheit

Hintergrund der Befragung:

Das DVGW-Arbeitsblatt W 216 beschreibt die Mischung von Wässern unterschiedlicher Herkunft. Anhand von mischungsrelevanten Parametern wird abgeleitet, inwiefern nachteilige Veränderungen der korrosionschemischen Eigenschaften des Mischwassers zu erwarten sind. Aus heutiger Sicht ist allerdings nicht mehr nachvollziehbar auf welcher wissenschaftlichen Grundlage die Beurteilungskriterien basieren.

Um die Grundlagen für eine Überarbeitung des Arbeitsblattes zu schaffen, wird derzeit ein gemeinsames Forschungsvorhaben von TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe und IWW in Mühlheim durchgeführt. Das Forschungsvorhaben wird durch den DVGW gefördert. Die Überarbeitung des Arbeitsblattes W 216 soll insbesondere auch praxisorientierte Ergebnissen berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund bitten wir Sie, den Fragebogen auszufüllen und dem TZW bzw. dem IWW zuzusenden. Ihre Praxiserfahrungen sind für die Überarbeitung des Regelwerkes besonders wichtig. Die von Ihnen gemachten Angaben werden selbstverständlich vertraulich behandelt.

1. Ansprechpartner (für evtl. Rückfragen):

Name: _____

Telefonnummer: _____

Email: _____

2. Wasserabgabe (in Mio. m³ pro Jahr): _____

3. Rohrnetz

Länge (km): _____

Materialien	Anteil in % von Netzlänge
Nicht korrodierende oder korrosiongeschützte Materialien: GG-Zm, GGG-ZM, St-Zm, PE, PVC, AZ	

4. Wasserbeschaffenheit:

Haben Sie unterschiedliche Wässer, die in Ihrem Versorgungsgebiet gemischt werden, sich in ihrer Beschaffenheit im Jahresverlauf signifikant ändert oder wurden Umstellungen im Rohrnetz vorgenommen (z.B. von hartem zu weichem Wasser)?

Ja Nein

(falls **nein**, bitte zum Fragenblock 7 gehen)

Wenn **ja**, welche Unterschiede weisen die Parameter der Einzelwässer bzw. vor und nach der Mischung bzw. nach der Umstellung auf? Falls weitere Mischwässer in Ihrem Versorgungsgebiet vorliegen, füllen Sie bitte eine weitere Kopie dieser Seite des Fragebogens aus.

5. Betrachtetes Mischwasserszenarium

Parameter	Einheit	Wasser A	Wasser B
Konzentrationsbereich		von - bis	von - bis
Sauerstoff	mg/L		
Härte	°dH		
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L		
pH-Wert	-		
Chlorid	mg/L		
Sulfat	mg/L		
TOC	mg/L		
Phosphat	mg/L-PO4		

Handelt es sich hierbei um zeitlich wechselnde Konzentrationsänderungen?

Ja Nein

Werden diese Wässer zentral in einem Behälter gemischt und von dort in das Versorgungsnetz eingespeist?

Ja Nein

Welches Mischungsverhältnis liegt dann im Regelfall vor?

	Wasser A	Wasser B
Mischungsverhältnis, % (von – bis)		

Erfolgt eine Behandlung des Mischwasser (z.B. pH-Korrektur) vor der zentralen Einspeisung?

Ja Nein

6. Auswirkungen bei der Mischung

Sind Auffälligkeiten in dem betreffenden Mischwasserbereich aufgetreten?

- Ja Nein

Wenn ja, welche Auffälligkeiten traten auf (z.B. Erhöhte Trübung, Rostwasser, Entzinkung von Messingarmaturen)?

Wie haben Sie auf die Auffälligkeiten reagiert (z.B. Wasseraufbereitung, Zonentrennung, Zugabe von Korrosionsinhibitoren, Rohrnetzspülungen)?

7. Informationsbedarf

Haben Sie Interesse an einem DVGW-Erfahrungsaustausch (DVGW-Workshop) zur Mischwasserthematik?

- Ja Nein

Haben Sie weitere Anmerkungen bzw. Anregungen für die Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216?

- Ja Nein

Wenn ja, welche?

► Bitte senden Sie den ausgefüllten Fragebogen an

TZW

Dr.-Ing. Sebastian Hesse, Karlsruher Str. 84, 76139 Karlsruhe
0721 9876-123, per E-Mail an sebastian.hesse@tzw.de

oder an

IWW Zentrum Wasser,
Dr.-Ing. Angelika Becker, Moritzstr. 26, 45476 Mülheim an der Ruhr
0208 40303-260, per E-Mail an a.becker@iww-online.de

Wir bedanken uns sehr im Namen des DVGW für Ihre Teilnahme!

10.2 Umfrageübersicht

Laufnr.	Resonanz	Infos	Laufnr.	Resonanz	Infos
1	keine Antwort		51	Weiterleitung	Chlorid nimmt zu, Phosphatierung
2	keine Antwort		52	keine Antwort	
3	keine Antwort		53	keine Antwort	
4	keine Antwort		54	offen	
5	keine Antwort		55	keine Antwort	
6	keine Antwort		56	keine Antwort	
7	keine Antwort		57	keine Antwort	
8	keine Antwort		58	keine Antwort	
9	Kurzmail		59	Onlineeingabe	Daten erhalten
10	keine Antwort		60	keine Antwort	
11	Kurzmail		61	Antwortbogen abgegeben, keine Mischwassererfahrung	
12	keine Antwort		62	keine Antwort	
13	keine Antwort		63	keine Antwort	
14	TZW-Mischwassergutachten 2005		64	Mail	Zonentrennung, keine Probleme
15	keine Antwort		65	keine Antwort	
16	Onlineeingabe	Daten erhalten	66	keine Antwort	
17	keine Antwort		67	keine Antwort	
18	keine Antwort		68	keine Antwort	
19	keine Antwort		69	keine Antwort	
20	Mail	kein Mischwasser	70	keine Antwort	
21	keine Antwort		71	keine Antwort	
22	keine Antwort		72	keine Antwort	
23	Telefonatskunft	kein Mischwasser	73	keine Antwort	
24	keine Antwort		74	keine Antwort	
25	Kurzmail	Kaum Erfahrungen, Zinkriesel, mehrere Phosphatstudien	75	keine Antwort	
26	Dateneingang		76	keine Antwort	
27	Kurzmail		77	keine Antwort	
28	keine Antwort		78	keine Antwort	
29	keine Antwort		79	Telefonat	kein Mischwasser
30	keine Antwort		80	Mail	kein Mischwasser
31	keine Antwort		81	keine Antwort	
32	keine Antwort		82	Mail	
33	Weiterleitung		83	Telefonat	Keine Probleme bekannt
34	Eintragung online		84	keine Antwort	
35	Eintragung online		85	keine Antwort	
36	keine Antwort		86	keine Antwort	
37	keine Antwort		87	keine Antwort	
38	keine Antwort		88	keine Antwort	
39	Weiterleitung	Wasser von gleicher Beschaffenheit	89	keine Antwort	
40	keine Antwort		90	keine Antwort	
41	keine Antwort		91	Mail	
42	Mail		92	keine Antwort	
43	keine Antwort		93	keine Antwort	
44	keine Antwort		94	mail	
45	keine Antwort		95	Telefonatskunft	
46	keine Antwort		96	Onlineeingabe	
47	keine Antwort		97	Telefonatskunft	kein Mischwasser
48	keine Mischwassererfahrung		98	keine Mischwassererfahrung	
49	keine Antwort		99	keine Antwort	
50	keine Antwort		100	Keine Mischwassererfahrung, danur Fernversorger	
			101	Onlineeingabe	
			102	keine Antwort	
			103	Mail	Antwortbogen liegt vor
			104	keine Antwort	
			105	Telefonatskunft	pH-Wert hochgenommen, keine Pro
			106	Onlineeingabe	Daten erhalten
			107	Mehrere Umstellungen (18 auf 3,5°dH), keine Probleme, Phos	

10.3 Projektinformation

MISCHBARKEIT VON TRINKWASSER

Ermittlung von wissenschaftlichen Grundlagen (GÜW216) für die Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216



Mischwassermanagement im
Wasserwerk

Das DVGW-Arbeitsblatt W 216 beschreibt die Mischung von Wässern unterschiedlicher Herkunft. Anhand von mischungsrelevanten Parametern wird abgeleitet, inwiefern nachteilige Veränderungen der korrosionschemischen Eigenschaften des Mischwassers zu erwarten sind. Aus heutiger Sicht ist allerdings nicht mehr nachvollziehbar, auf welcher wissenschaftlichen Grundlage die Beurteilungskriterien basieren. Ziel des Forschungsvorhabens ist, die wissenschaftlichen Grundlagen für eine Überarbeitung des Arbeitsblattes auszuarbeiten.

Beim DVGW-Arbeitsblatt W 216 wird die Vorgehensweise zur Bewertung der Unterschiedlichkeit von Trinkwässern vorgegeben. Ferner werden in dem Arbeitsblatt geeignete technische Maßnahmen für die Fälle aufgezeigt, bei denen unterschiedliche Trinkwässer oder Mischwässer vorliegen, um eventuelle Nachteile für die Wasserversorgungsanlagen sowie für die Abnehmer zu vermeiden.

Zur Bewertung werden die Parameter Chlorid, TOC, Phosphat, Säurekapazität bis zum pH-Wert 4,3 ($K_{S4,3}$), Sauerstoff und Sulfat herangezogen. Für jeden dieser Parameter sowie für den Anionenkoeffizienten, der sich aus den Parametern Chlorid, Sulfat und Säurekapazität ($K_{S4,3}$) errechnet, ist ein Bewertungsmaß vorgegeben. Anhand dessen kann unter Heranziehung der Ergebnisse von aktuellen Trinkwasseranalysen beurteilt werden, ob ein Wasser von gleichmäßiger Beschaffenheit ist und ob zwei Wässer von gleicher oder unterschiedlicher Beschaffenheit vorliegen. Die Ergebnisse dieser Bewertung sind die Grundlage für die Einstufung von zwei oder mehr Wässern als "mischbar" im Sinne der allgemein anerkannten Regeln der Technik. Hält man sich an die Bewertung, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Beschaffenheit des Mischwassers selbst oder die der Rohrleitungen nicht – verursacht durch die Mischung – nachteilig verändert, z. B. durch eine Veränderung der korrosionschemischen Eigenschaften.

Es ist aus heutiger Sicht allerdings nicht mehr nachvollziehbar, auf welcher Grundlage die Liste der für die Bewertung herangezogenen Parameter erstellt worden ist. Auch die wissenschaftliche Basis für die Bewertungsmaße lässt sich aus heutiger Sicht nicht erkennen. Bevor über eine Überarbeitung und eine mögliche Änderung des Arbeitsblattes W 216 entschieden werden kann, müssen die wissenschaftlichen Grundlagen, auf denen die derzeitigen Festlegungen basieren, nachvollzogen und ggf. ergänzt oder verändert werden.

In dem Forschungsvorhaben soll daher auf wissenschaftlicher Basis die Liste der derzeit für die Bewertung verwendeten Parameter dahingehend geprüft werden, ob Parameter gestrichen oder ggf. die zulässigen Bandbreiten vergrößert werden könnten, ohne dass die Aussagekraft eingeschränkt wird. Ferner soll der Frage nachgegangen werden, ob weitere Parameter zu betrachten sind, deren Tragweite bisher nicht erkannt worden ist. Die Erkenntnisse aus dem Vorhaben können dann als Grundlage für eine Entscheidung über die Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes W 216 dienen.

[Zurück](#)

Bisher sind in der Schriftenreihe

Veröffentlichungen aus dem Technologiezentrum Wasser Karlsruhe

folgende Bände erschienen:

Band 1	Von der Analytik zur Problemlösung	€ 15,--
Band 2	Sicherung der Trinkwassergüte bei der Wasserverteilung und Wasserverwendung	€ 15,--
Band 3	Forschung im Wasserfach - Umfrage zur DVGW-Forschung	€ 15,--
Band 4	Grundwasserbelastung durch frühere Herbizidanwendungen auf Gleisanlagen	€ 23,--
Band 5	Die EU-Trinkwasserrichtlinie.....	€ 15,--
Band 6	Forschung im TZW..... - Stickstofforganische Mikroverunreinigungen - Bestimmung organischer Phosphonsäuren - Adsorption aromatischer Sulfonate	€ 15,--
Band 7	Praxisorientierte Untersuchungen zur mikrobiellen reduktiven Dechlorierung von leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW).....	€ 15,--
Band 8	Aktuelle Themen zur Trinkwasseraufbereitung und -verteilung.....	€ 15,--
Band 9	Geogene Grundwasserversalzung in den Porengrundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft	€ 23,--
Band 10	Cryptosporidien und Giardien: Rohwasserbehandlung durch Inaktivierungs- und Filtrationsverfahren - Literaturstudie.....	€ 23,--
Band 11	Mechanismen der Entcarbonisierung bei der Aufbereitung von Trinkwasser	€ 15,--
Band 12	Biologischer Abbau organischer Wasserinhaltsstoffe aus reduziertem Grundwasser in Schnellfiltern zur Enteisung, Nitrifikation und Entmanganung	€ 15,--
Band 13	5 Jahre Heinrich-Sontheimer-Laboratorium (HSL) - Praxisnahe Forschung und Projektmanagement	€ 15,--
Band 14	Fallstudien zur mikrobiologischen Belastung von Quellwässern – Ergebnisse für Quellen aus wenig geschützten Festgesteinsgrundwasserleitern in Baden-Württemberg	€ 18,--
Band 15	Mikrobiologische Aspekte bei der Trinkwassergewinnung, Aufbereitung und Verteilung.....	€ 15,--
Band 16	Verwendung und Entsorgung arsenhaltiger Wasserwerksschlämme	€ 15,--

Band 17	Minimierung der Desinfektionsnebenprodukte und der Wiederverkeimung im Verteilungsnetz von Fernwasserversorgungssystemen	€ 15,--
Band 18	Aktuelle Themen bei der Trinkwassergewinnung	€ 15,--
Band 19	Neuartige Kriterien zur Beurteilung der Notwendigkeit und Art von Aufbereitungsmaßnahmen bei Vorliegen mikrobiell belasteter Rohwässer	€ 15,--
Band 20	Aminopolycarbonsäuren in der aquatischen Umwelt - Quellen, Vorkommen, Umweltverhalten, Toxizitäten und Beseitigung.	€ 30,--
Band 21	Einfluss von Werkstoffen und Betriebsbedingungen bei der Trinkwasserversorgung.	€ 15,--
Band 22	Chlordioxid in der Wasseraufbereitung - Ausgewählte Ergebnisse aus Forschungsvorhaben.	€ 15,--
Band 23	Qualitätsveränderungen bei der Aufbereitung und Verteilung von Trinkwasser aus reduzierten Grundwässern	€ 15,--
Band 24	Voruntersuchungen zum Einsatz von Feinfiltersystemen in Kleinanlagen zur Trinkwassergewinnung	€ 15,--
Band 25	Qualitätssicherung in der Wasseraufbereitung	€ 15,--
Band 26	Validierung und Weiterentwicklung eines standortunabhängigen Bodenkontrollverfahrens zur Ermittlung der Nitratauswaschung mit Modellrechnungen	€ 15,--
Band 27	Spülung von Wasserversorgungsnetzen zur Vermeidung der Rostwasserbildung	€ 15,--
Band 28	Ressourcen- und Grundwasserschutz	€ 20,--
Band 29	Vorkommen und Bewertung von Arzneimittelrückständen in Rhein und Main / Antibiotikaresistenzen in der Umwelt - Ursachen, Nachweis, Verbreitung -	€ 20,--
Band 30	Organische Spurenstoffe in der Wasserversorgung.....	€ 20,--
Band 31	Pflanzenschutzmittel in Böden, Grund- und Oberflächenwasser ..	€ 40,--
Band 32	Partikelentfernung in Kleinanlagen	€ 20,--
Band 33	Bestandsaufnahme zum Betrieb von MF/UF-Anlagen in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland	€ 20,--
Band 34	Desinfektionsverfahren in der Trinkwasseraufbereitung unter besonderer Berücksichtigung der UV-Desinfektion	€ 20,--
Band 35	Toxizitätstests zur Überwachung von Trinkwasser - Literaturstudie -	€ 20,--

Band 36	Coliforme Umweltkeime in Trinkwasserverteilungssystemen - Vorkommen, Anreicherung und Vermehrung	€ 20,--
Band 37	Stimulation des mikrobiologischen Chlorethen-Abbaus durch Einsatz von Elektrolyse	€ 20,--
Band 38	Wassertechnologische Möglichkeiten zur Lösung aktueller Fragestellungen	€ 20,--
Band 39	Erfassung und Bewertung von Nanofiltrations- und Niederdruck- umkehrosioseanlagen in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland	€ 20,--
Band 40	Bedeutung von Antibiotikaresistenzen für die Rohwasserqualität: Vorkommen, Transport und natürliche Eliminationsprozesse	€ 20,--
Band 41	Vorkommen, Toxizität und mikrobiologischer Abbau heterozyklischer Kohlenwasserstoffe	€ 20,--
Band 42	Untersuchungen zur Minimierung der Kupferabgabe in Trinkwasserinstallationen	€ 25,--
Band 43	Natural attenuation am Standort Frankenthal: mikrobiologischer sequentiell anaerob-aerober Chlorethen-Abbau mit Kohlenstoff- Isotopenfraktionierung	€ 25,--
Band 44	Fragestellungen bei der Wasserverteilung vom Wasserwerk bis zum Zapfhahn	€ 25,--
Band 45	Konzepte für eine zukunftsfähige Wasserversorgung	€ 25,--
Band 46	Vorkommen, Verhalten und Bildung von Nitrosaminen in aquatischen Systemen und ihre Bedeutung für die Trinkwasserversorgung	€ 25,--
Band 47	Wissenschaftliche Begleitung und Ergebnisauswertung des Projektverbundes zum BMBF-Förderschwerpunkt „Sickerwasserprognose“	€ 25,--
Band 48	Minimierung sedimentbürtiger Gütebeeinträchtigungen durch modellgestützten Rohrnetzbetrieb	€ 25,--
Band 49	Desinfektion in Trinkwasser-Installationen unter besonderer Berücksichtigung des Warmwasserbereiches – Ergebnisse von Untersuchungen in der Praxis	€ 25,--
Band 50	Innovation und Praxisforschung für das Wasserfach	€ 25,--
Band 51	Entwicklung und Umsetzung eines MNA-Konzeptes an einem Teeröl-kontaminierten Standort	€ 25,--
Band 52	Aktuelle Themen im Grundwasserschutz: 1. Entwicklung einer Rohwasserdatenbank 2. Wärmeträgerfluide in der Geothermie	€ 25,--

Band 53	Studie zur Bedeutung von Bioziden für die Trinkwasserversorgung.....	€ 25,--
Band 54	Untersuchungen zur Umsetzung von <i>N,N</i> -Dimethylsulfamid (DMS) durch Desinfektionsmaßnahmen mit Chlor	€ 25,--
Band 55	Grundlagen für sichere Entscheidungen in der Wasserversorgung	€ 25,--
Band 56	Betrieb von UV-Desinfektionsgeräten in der Praxis.....	€ 25,--
Band 57	Mikrobiologische Aspekte in Trinkwasserverteilungssystemen	€ 25,--
Band 58	Vermeidung organoleptischer Beeinträchtigungen von Trinkwasser	€ 25,--
Band 59	Bewertung von Transformationsprodukten bei der Trinkwasseraufbereitung	€ 25,--
Band 60	Handlungsstrategien bei sich ändernden Rahmenbedingungen.....	€ 25,--
Band 61	Wirksamkeit der Elimination von Viren durch Filtrationsverfahren der Trinkwasseraufbereitung	€ 25,--
Band 62	Elimination anthropogener organischer Spurenstoffe im Zuge der Grundwasseranreicherung	€ 25,--
Band 63	Verbleib von DOC und Spurenstoffen bei der Grundwasseranreicherung in den Längen Erlen (Basel)	€ 25,--
Band 64	DOC-Analytik mittels 2D-Fluoreszenzspektroskopie	€ 25,--
Band 65	Neue Methoden und Verfahren für die Wasserversorgung	€ 25,--
Band 66	Aerob-produktiver Abbau von Chlorethenen: Nachweis eines neuen Abbauweges für Trichlorethen.....	€ 25,--
Band 67	Anaerober CKW-Abbau: Molekularbiologie, Substanzspektrum, Isotopenfraktionierung	€ 25,--
Band 68	Der Yeast-Estrogen-Screen (YES)-Assay: Evaluierung und Anwendung.....	€ 25,--
Band 69	Bewertung von Spülverfahren für Trinkwasserleitungen	€ 25,--
Band 70	Innovative Entwicklungen aus dem Forschungsradar Wasser	€ 25,--
Band 71	Auswirkung von Konzentraten der Trinkwasserenthärtung in Fließgewässern	€ 25,--
Band 72	Vorkommen und Abbau von Teerölschadstoffen unter instationären Fließ- und Redoxbedingungen.....	€ 25,--

Band 73	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> in Trinkwassersystemen 1. Wachstumsansprüche und Gegenmaßnahmen 2. Belastung von Wasserzählern.....	€ 25,--
Band 74	Präventives Risikomanagement in der Trinkwasserversorgung	€ 25,--
Band 75	Zukunftssicherer Betrieb von Wasserversorgungsanlagen	€ 25,--
Band 76	Verhalten von Antibiotika-Resistenzgenen bei der Trinkwasseraufbereitung	€ 25,--
Band 77	Identifizierung und Bewertung von Eintragsquellen mikrobiologischer Belastungen.....	€ 25,--
Band 78	Verhalten von Phosphonaten als Antiscalants bei der Membranfiltration.....	€ 25,--
Band 79	Hochaufgelöste Verbrauchsmessungen bei Kunden	€ 25,--
Band 80	Entwicklungstrends für die Wasserversorgung.....	€ 25,--
Band 81	Molekularbiologische Lebend/tot-Unterscheidung.....	€ 25,--
Band 82	Bewertung der Wirkung von Korrosionsinhibitoren im Verteilungsnetz.....	€ 25,--
Band 83	Roadmap DVGW Forschungsstrategie Wasser 2025	€ 25,--
Band 84	Minimierungsstrategie für den PSM-Metaboliten-Eintrag ins Grundwasser.....	€ 25,--
Band 85	Impuls zu aktuellen Wasserthemen	€ 25,--
Band 86	Enterokokken in Trinkwassersystemen - Vorkommen, Vermehrung, Desinfektion	€ 25,--
Band 87	Optimierung der Analytik des EOF und verschiedener PFAS-Stoffklassen (EOFplus).....	€ 25,--
Band 88	Kombinierte Bio-Elektro-Verfahren zur Stromgewinnung und Spurenstoffelimination	€ 25,--
Band 89	Vermehrung von Legionellen im Kaltwasser	€ 25,--
Band 90	Zukunftsthemen der Wasserversorgung	€ 25,--
Band 91	Charakterisierung von LED-basierten UV-Desinfektions- modulen.....	€ 25,--
Band 92	Quantitative mikrobielle Risikobewertung.....	€ 25,--
Band 93	SARS-CoV-2 im Kontext der Wasserversorgung	€ 25,--

Band 94	Durchflusszytometrie als schnelle Detektionsmethode für Bakterien	€ 25,--
Band 95	Innovationen für eine zukunftsfeste Wasserversorgung.....	€ 50,--
Band 96	Rahmenbedingungen für die Mischung von Trinkwässern.....	€ 25,--

Die Preise beinhalten 7 % MwSt.

Alle verfügbaren Bände können schriftlich bestellt werden bei:

TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser
Karlsruher Straße 84
D-76139 Karlsruhe

oder über das Online-Bestellformular auf der TZW-Website
<https://tzw.de/informationen/publikationen>

ISSN 1434-5765

