

**ENTWURF**

# **Untersuchung des zentralen Kaltwassersystems auf dem Universitätsgelände**

## **Kaltwasserüberprüfung**

**Projektergebnisse zum Angebot 10122/2025/27693**

**Juli 2025**

### **Auftraggeber:**

**Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

**Herr Bruchhausen**

## Bearbeitung

### IWW Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH

Moritzstraße 26  
45476 Mülheim an der Ruhr  
[iww-wasserforschung.de](http://iww-wasserforschung.de)

Timo Jentzsch, M. Sc. (Projektleitung)  
Telefon: 0208 40303-260  
[t.jentzsch@iww-online.de](mailto:t.jentzsch@iww-online.de)

Julia Hesse, M.Sc.  
Telefon: 0208 40303-264  
[j.hesse@iww-online.de](mailto:j.hesse@iww-online.de)

Dr.-Ing. Michaela Tröger  
Telefon: 0208 40303-263  
[m.troeger@iww-online.de](mailto:m.troeger@iww-online.de)

Wissenschaftlicher Direktor:  
Prof. Dr. Stefan Panglisch

### Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Universitätsstraße 1  
40225 Düsseldorf

Dirk Bruchhausen  
Telefon: +49 211 81-12634  
[Dirk.Bruchhausen@hhu.de](mailto:Dirk.Bruchhausen@hhu.de)  
<http://www.hhu.de/>

Bearbeitungszeitraum: Mai 2025 bis Juli 2025

Zur besseren Lesbarkeit wird nicht zwischen weiblichen und männlichen Berufsbezeichnungen unterschieden; es sind immer beide Geschlechter gleichberechtigt angesprochen.

[IWWIWW-Bericht\\_27693\\_Entwurf.docx](#)

Geschäftsführer:in: Dr. Kristina Wencki

Sprecher Wissenschaftliches Direktorium:  
Prof. Dr. Torsten C. Schmidt

Amtsgericht Duisburg · HRB 37601  
Sitz: Mülheim a. d. Ruhr · USt-IdNr.: DE367099107

Sparkasse Mülheim an der Ruhr  
IBAN DE54 3625 0000 0175 1961 61 · BIC SPMHDE33XXX

Commerzbank AG Mülheim an der Ruhr  
IBAN DE57 3624 0045 0765 6218 00 · BIC COBADEFFXXX

[iww-wasserforschung.de](http://iww-wasserforschung.de)

## Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass die Situation im Kreislaufwasser hinsichtlich der mitgeführten Partikelfracht im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Vorläufer-Projekten aus den Jahren 2016 bis 2021 zwar eine Verringerung im Rücklauf der Technik-Zentrale 1, jedoch eine starke Erhöhung im Bereich des Neubaus und der Ersatz-Neubauten aufweist. Die hier bestimmten chemischen Parameter weisen eine ähnliche Tendenz auf.

Die allgemeine Situation im Kaltwassersystem der neuen Gebäude ist insofern kritisch, als dass deutliche Anteile an gelöstem Eisen bestimmt wurden, welche auf eine vorhandene Korrosionsaktivität hindeuten. Besonders auffällig sind jedoch die Gehalte an partikulär vorliegendem Aluminium und Kupfer, z. T. partikulär vorliegendem Mangan und Silicium, die auf Korrosionsvorgänge an Bauteilen aus Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen hindeuten können.

Aufgrund der absoluten Menge der Partikelfracht innerhalb des Systems, auch im Jahr 2025 wieder besonders hoch festgestellt in der Probe im Rücklauf der Technik-Zentrale 2, 26.51, können Beeinträchtigungen von Kältemaschinen (oder anderen Geräten mit feingliedrigen beweglichen Bauteilen) nicht ausgeschlossen werden.

## Empfehlungen

Mit der nach wie vor festgestellten und sich auf die neuen Gebäude ausbreitenden großen Partikelfracht ist eine Beeinträchtigung der Kältemaschinen nicht auszuschließen. Hinzu kommt die Vermutung, dass Korrosionsprozesse an Aluminiumwerkstoffen stattfinden, so dass zukünftig auftretende Schäden an solchen Bauteilen nicht ausgeschlossen werden können.

Daher wird dringend empfohlen, die nachfolgend genannten Maßnahmen baldmöglichst umzusetzen, falls noch nicht erfolgt:

- Erfassung der Nachspeisemengen durch digitale Datenübertragung an die Leitzentrale
- Optimierung des vorhandenen Filtersystems, nunmehr mit Fokus auf der Partikelentfernung der Technik-Zentrale 2, Neubau und Ersatz-Neubauten
- Installation einer weiteren Bypass-Strecke mit Einbau von zwei Proberohrstücken zur begleitenden Korrosionsuntersuchung nach verschiedenen Methoden (in einem gesonderten Folge-Projekt zu bearbeiten)
- Erstellung eines Konzeptes zur Verbesserung der Wasserbeschaffenheit im Hinblick auf korrosionsfördernde Inhaltsstoffe (Wasseraufbereitung) bzw. Korrosionsschutzmaßnahmen

Es wird eine intensive engmaschige Kontrolle der Wasserbeschaffenheit (Monitoring oder online-Überwachung) an repräsentativen Stellen im Kaltwassersystem empfohlen, um einerseits den Erfolg der Maßnahmen zu dokumentieren und andererseits die Wasserbeschaffenheit zu überwachen, damit ggf. einer kritischen Situation rechtzeitig durch geeignete Schutzmaßnahmen entgegengewirkt werden kann.

Im Hinblick auf Bauteile aus Aluminiumwerkstoffen helfen folgende Untersuchungen bei der Einschätzung der aktuellen Situation und Eingrenzung geeigneter Gegenmaßnahmen:

- Bestandsaufnahme der verwendeten Werkstoffe in den Kältekreisläufen TZ 2, Neubau, Ersatz-Neubauten
- Überprüfung der Innenoberflächen von Bauteilen aus Aluminiumwerkstoffen z. B. im Rahmen einer Inspektion oder durch Schadensanalyse nach Ausbau von Teilstücken
- Probenahme im Hinblick auf mikrobiologische Aktivität (z. B. sulfatreduzierende Bakterien)

IWW Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH

Mülheim an der Ruhr, den 18.07.2025

i.V.

i.A.

Timo Jentzsch  
Geschäftsfeldleiter Korrosionsschutz

Julia Hesse  
Korrosionsschutz

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	6
1.1	Hintergrund.....	6
1.2	Auftrag und Projektdurchführung .....	7
2	Kaltwasserbeschaffenheit .....	8
2.1	Ortstermin .....	8
3	Analyseergebnisse .....	15
3.1	Vor-Ort-Messungen .....	15
3.2	Ergebnisse der anorganisch-chemischen Analyse .....	16
3.3	Ergebnisse der Partikeluntersuchung .....	25
4	Vergleich der Partikelergebnisse mit früheren Ergebnissen .....	30

## **1. Einleitung**

### **1.1 Hintergrund**

Das Kaltwasser-Rohrleitungssystem auf dem Universitätsgelände der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf weist eine erhebliche Partikelfracht im Kreislaufwasser auf. Festgestellt wurde dies erstmals im Jahr 2015 im Rahmen einer Routineüberprüfung des Kreislaufsystems durch die Universität Düsseldorf, nachdem sich Schmutzfänger während des Betriebs teilweise in kürzester Zeit zugesetzt hatten.

Seitdem fanden mehrere Beprobungen zur Überprüfung des Kaltwassers der Technik-Zentrale 1 und der Übergabestation 25 im Hinblick auf die Partikelfracht statt (s. IWW-Projekte 2015/23502, 2019/24879 und 2020/25649), so dass die Entwicklung über diesen Zeitraum hinweg nachverfolgt werden kann. Bei der zuletzt durchgeführten Kaltwasserüberprüfung des Kreislaufwassers im Jahr 2021 (s. IWW-Projekt 2021/26000 mit Abschlussbericht) wurde der Beprobungsumfang auf die Technik-Zentrale 2, den Neubau Biologie und die Ersatz-Neubauten verlagert. Grund hierfür war das Auftreten erheblicher Verschmutzungen in den Gebäuden 25 und 26 nach zeitweiser Fließrichtungsumkehr im Kaltwassersystem der Universität und vermutetem Partikeleintrag in die dortigen (neuen) Kaltwassersysteme.

Entsprechende Beschwerden über störende Trübungs- und Färbungserscheinungen wurden daraufhin gemeldet. Um den dauerhaften Betrieb der Kältemaschinen nicht zu gefährden, sollte die Partikelfracht im Kreislaufwasser so gering wie möglich gehalten werden.

Zur Entfernung der erheblichen Partikelkonzentration im Kaltwasser und zur Hemmung der Mobilisierung und Neubildung von Partikeln wurden bereits verschiedene Methoden erörtert, wie z. B. Optimierung des vorhandenen Filtersystems, Spülmaßnahmen und Wasserbehandlung. Als weitere Maßnahme wurde eine engmaschige Kontrolle der Wasserbeschaffenheit (Monitoring) im Kaltwasserkreislauf empfohlen, um den Erfolg bereits durchgeführter Maßnahmen zu dokumentieren und die Wasserbeschaffenheit zu überwachen, damit ggf. einer kritischen Situation rechtzeitig durch gezielte Abhilfemaßnahmen entgegengewirkt werden kann.

## 1.2 Auftrag und Projektdurchführung

Vor diesem Hintergrund beauftragte die Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf („Auftraggeber“) die IWW Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH („IWW“) mit Schreiben vom 05.05.2025, Auftrag Nr. 53-597805/25 B25-005960, in einem Projekt folgende Fragen zu beantworten:

- Wie ist die Entwicklung des Kaltwassersystems im Jahr 2025 hinsichtlich der Beschaffenheit des Kreislaufwassers (chemische Zusammensetzung und Partikelfracht) zu bewerten?
- Wie ist die Korrosionsaktivität innerhalb der verschiedenen Teilbereiche des Systems zu bewerten?
- Welche Maßnahmen können im Hinblick auf den künftigen Betrieb des Kaltwasserkreislaufs empfohlen werden?

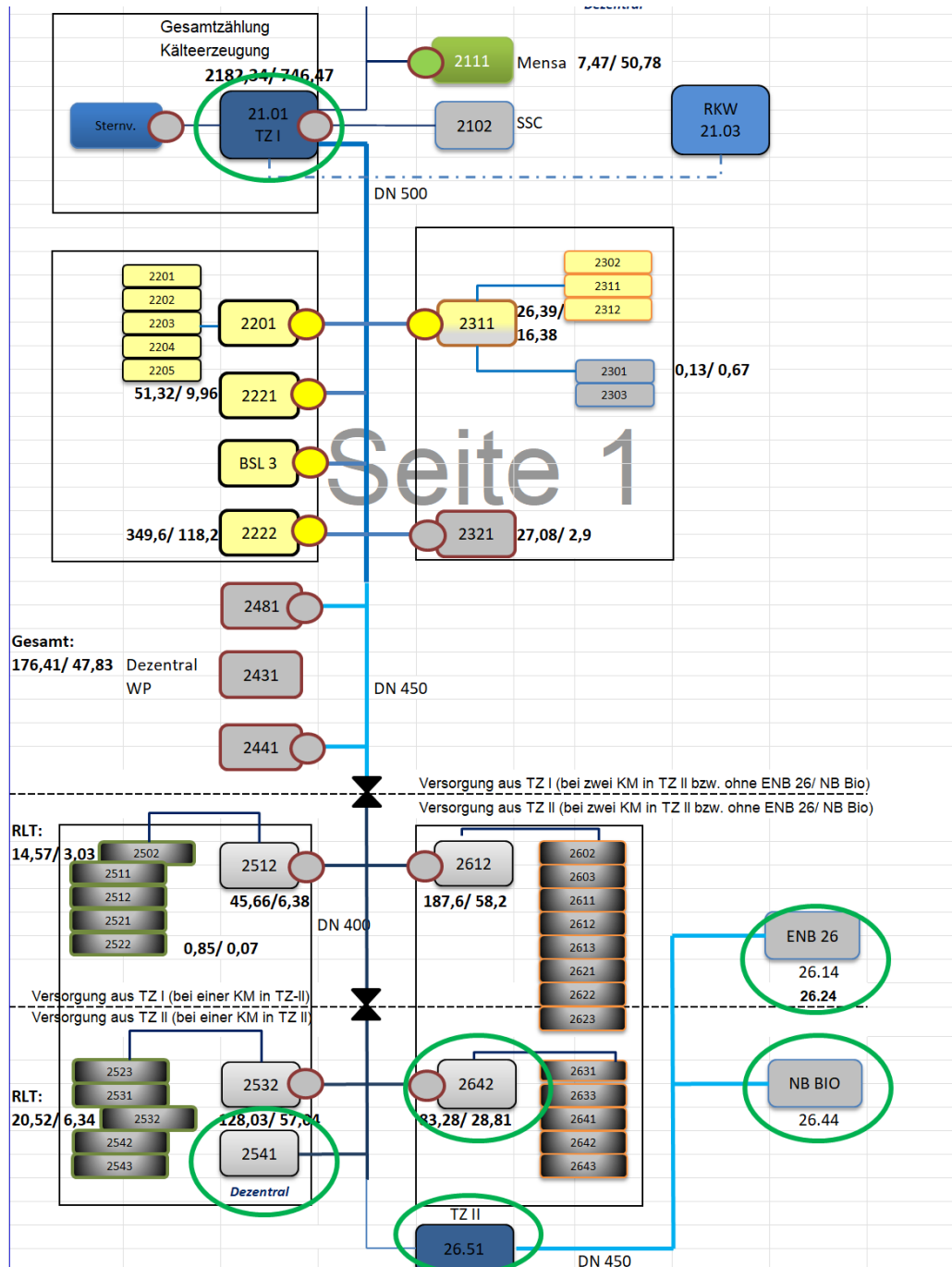
## **2 Kaltwasserbeschaffenheit**

### **2.1 Ortstermin**

Am 12.06.2025 wurden Proben aus dem Kaltwassersystem an verschiedenen Probenahmestellen und eine Probe aus dem Nachspeisewasser genommen. Bei allen Beprobungen wurden jeweils zunächst einige Liter Wasservolumen verworfen und anschließend die Probenahme durchgeführt. So wurde sichergestellt, dass die Wasserprobe repräsentativ für den Beprobungsbereich war und nicht durch etwaig vorhandene sedimentierte Partikel im Stutzenbereich des Probenahmeventils verunreinigt war. Bei der Probenahme wurde größtenteils ein in das Probenahmegefäß hineinreichender Kunststoffschlauch verwendet, um eine unerwünschte Veränderung der Wasserprobe durch Luftzutritt möglichst zu vermeiden.

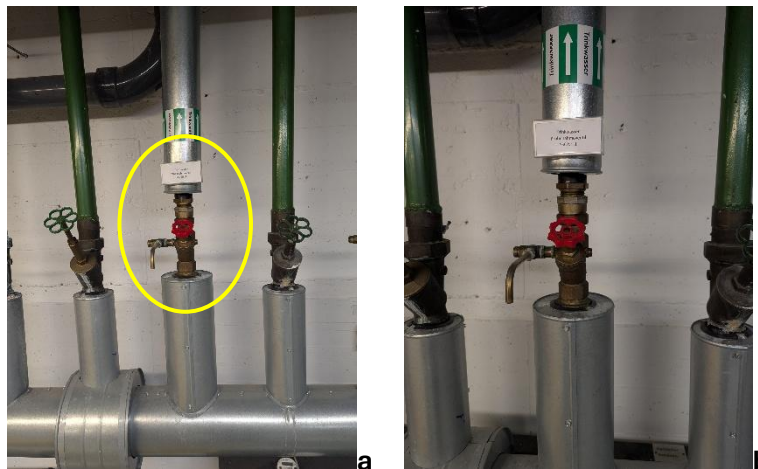
Abbildung 1 gibt zunächst einen Überblick über die beprobten Bereiche innerhalb des Kaltwassersystems der Heinrich-Heine-Universität. Sie sind in der Darstellung mit grünen Ellipsen markiert.

Die insgesamt zehn Beprobungen des Kreislaufwassers erfolgten in den beiden Technik-Zentralen 1 und 2 sowie in den Gebäudekomplexen 25 und 26. Aufgrund der Begrenzung des Gesamtprobenumfangs auf zehn Proben wurde eine repräsentative Auswahl der Probenahmestellen getroffen. Größtenteils wurden Vorlauf und Rücklauf der Technik-Zentralen und Gebäudeinstallationen, z. T. nur der Rücklauf beprobt. Die Beprobungen wurden an diesem Termin an leicht zugänglichen Entnahmestellen durchgeführt.



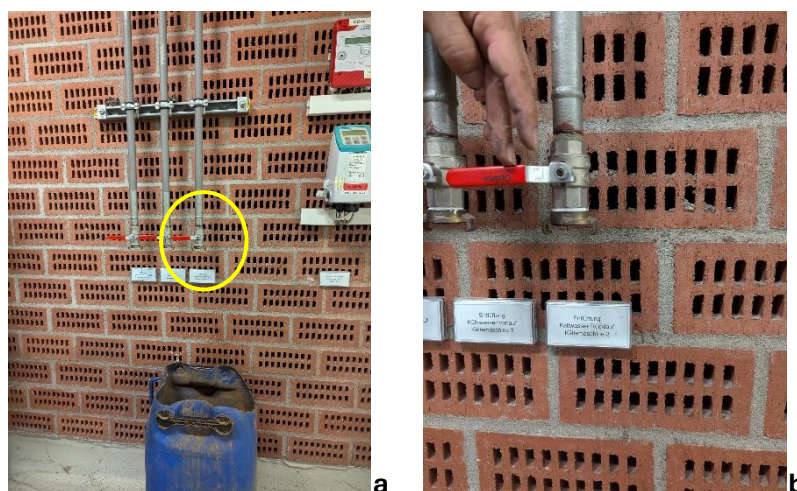
**Abbildung 1: Ausschnitt aus Topologie Kälte HHU 2015, ergänzt durch IWW**

Als Nachspeisewasser wird unbehandeltes Trinkwasser des örtlichen Wasserversorgungsunternehmens verwendet. Die Beprobung des Nachspeisewassers (Abbildung 2) erfolgte im Untergeschoss der Technik-Zentrale 1 (TZ 1, Gebäude 21.01), welche sich nördlich der weiteren in dieser Untersuchung beprobten Gebäude befindet.



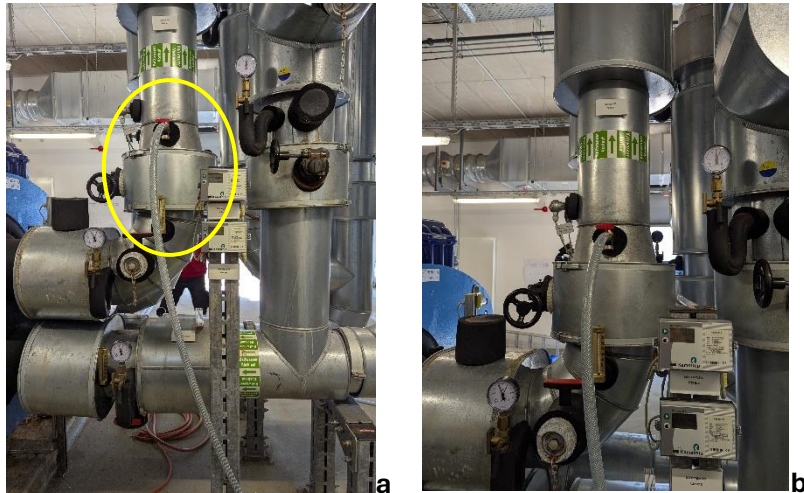
**Abbildung 2: Probenahmestelle Technik-Zentrale 1, Nachspeisewasser (21.01 TZ 1 Nachspeisung)**

In der Technik-Zentrale 1 wurde neben dem Nachspeisewasser auch der Kaltwasser-Rücklauf (Abbildung 3) im Erdgeschoss an der Entlüftung der Kältemaschine 3 beprobt.



**Abbildung 3: Probenahmestelle Technik-Zentrale 1, Rücklauf (21.01 TZ 1, RL)**

In der Technik-Zentrale 2 im Süden des Universitätsgeländes wurden aus dem Vorlauf (Abbildung 4) und dem Rücklauf (Abbildung 5) Proben zur Untersuchung genommen. Die Probenahmestelle im Vorlauf befindet sich an der Leitung nahe des Kältemengenzählers, während als Probenahmestelle im Rücklauf die Entlüftungsleitung der Kaltwasserpumpe 1 dient.



**Abbildung 4: Probenahmestelle Technik-Zentrale 2, Vorlauf (26.51 TZ 2 VL)**

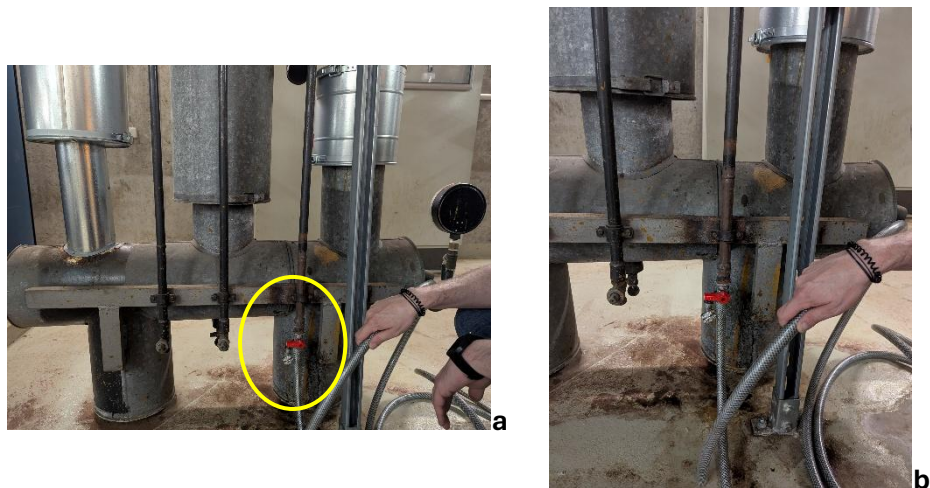


**Abbildung 5: Probenahmestelle Technik-Zentrale 2, Rücklauf (26.51 TZ 2 RL)**

In den Altbauten 25.41 und 26.42 wurden jeweils die Rückläufe (Abbildung 6 und Abbildung 7) beprobt. Im Gebäude 25.41 ist die ausgewählte Probenahmestelle mit Kälte-Rücklauf HD-Geräte Versammlungsraum, Ebene 01 gekennzeichnet; im Gebäude 26.42 befindet sich die Probenahmestelle mit der Bezeichnung Rücklauf Kälte Sonderräume in der Sanitärzentrale mit der Raumkennzeichnung U2.31.

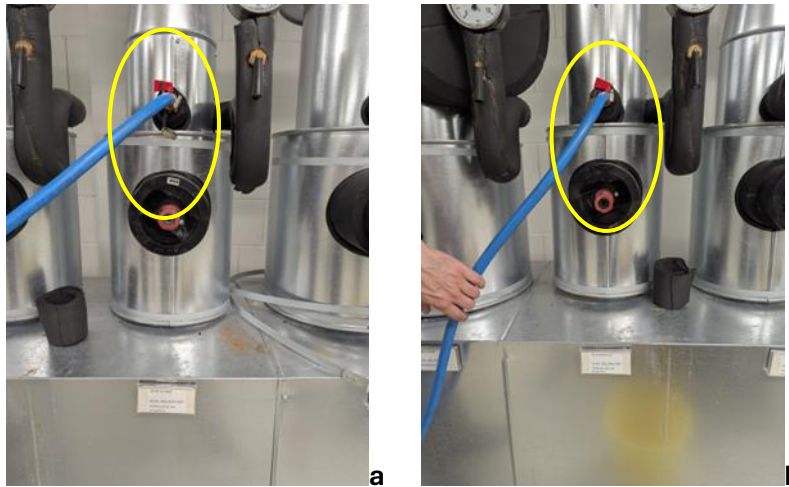


**Abbildung 6: Probenahmestelle Gebäude 25.41, Rücklauf (25.41 Altbau RL)**



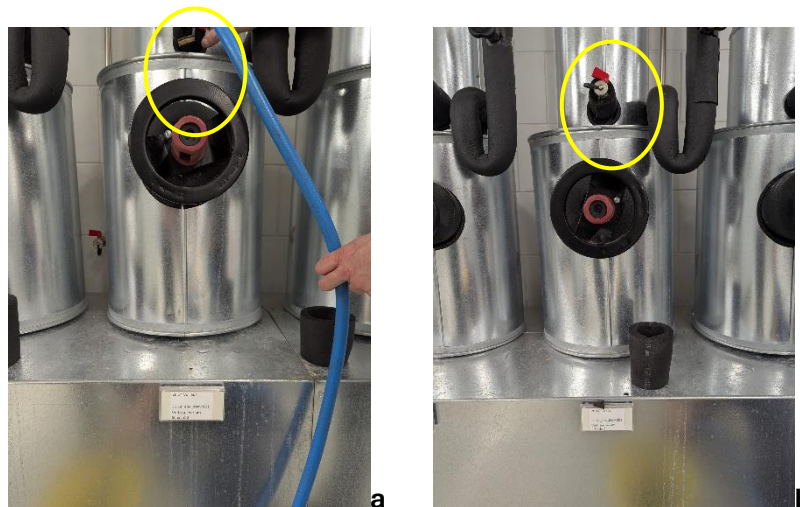
**Abbildung 7: Probenahmestelle Gebäude 26.42, Rücklauf (26.42 Altbau RL)**

Die Beprobung des Neubaus Biologie 26.44 wurde im Vorlauf und im Rücklauf des Kältekreislaufs durchgeführt (Abbildung 8). Beide Probenahmestellen befinden sich in der Heizungs- und Kältezentrale Raum U2.019 und sind bezeichnet mit Verbraucher am Schacht 2.



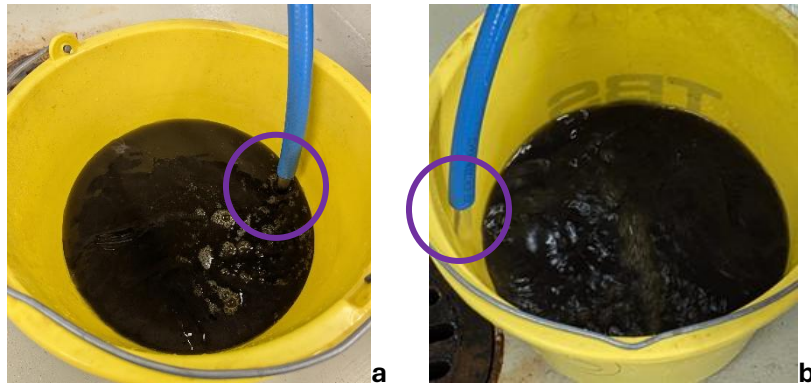
**Abbildung 8: Probenahmestellen Neubau Biologie 26.44, (a) Vorlauf (26.44 Neubau VL) und (b) Rücklauf (26.44 Neubau RL)**

Im Ersatz-Neubau 26.14 wurden als Probenahmestellen der Vorlauf und Rücklauf (Abbildung 9), jeweils gekennzeichnet mit der zusätzlichen Angabe Verbraucher an Schacht 2 (Heizungs- und Kältezentrale Raum U2.018), gewählt.



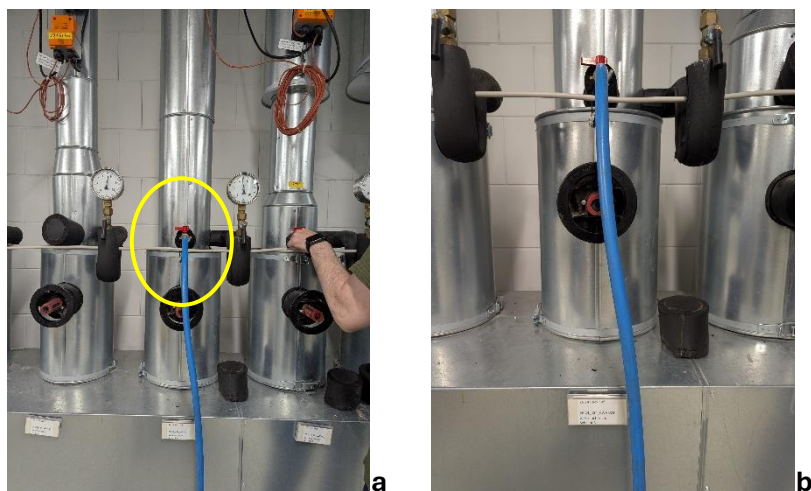
**Abbildung 9: Probenahmestellen Ersatz-Neubau 26.14, Vorlauf (26.14 ENB VL) und Rücklauf (26.14 ENB RL)**

Abbildung 10 verdeutlicht die Partikelbelastung an den Probenahmestellen, hier exemplarisch im Rücklauf des Ersatz-Neubaus 26.14. Direkt nach dem Öffnen des Probenahmeventils war die Partikelbelastung durch sedimentierte Partikel sehr hoch (Ablauf aus Schlauch Bild a), zu erkennen an der starken Schwarzfärbung des Ablaufwassers. Nach Ablauf des Stagnationswassers aus dem Bereich des Stutzens wurde das Wasser allmählich klarer (Ablauf aus Schlauch Bild b).



**Abbildung 10: Partikelbelastung Probenahmestelle Ersatz-Neubau 26.14, Rücklauf (26.14 ENB RL)**

Zudem wurde im Ersatz-Neubau 26.24 der Rücklauf mit der Bezeichnung Verbraucher am Schacht 3 (Heizungs- und Kältezentrale Raum U2.088) beprobt.



**Abbildung 11: Probenahmestelle Ersatz-Neubau 26.24, Rücklauf (26.24 ENB RL)**

### 3 Analyseergebnisse

#### 3.1 Vor-Ort-Messungen

Die Wasserproben wurden direkt vor Ort hinsichtlich einiger Parameter untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1: Vor-Ort-Parameter vom 12.06.2025**

Probe	Temperatur [°C]	Elektrische Leitfähigkeit [µS/cm]	pH-Wert [-]	Sauerstoff [mg/l]
<b>21.01 TZ 1 Nachspeisung</b>	13,0	703	7,66	7,95
<b>21.01 TZ 1 RL</b>	11,9	545	<b>8,13</b>	<b>9,30</b>
<b>26.51 TZ 2 VL</b>	10,5	532	8,36	0,10
<b>26.51 TZ 2 RL</b>	13,7	531	8,32	0,10
<b>25.41 Altbau RL</b>	19,4	546	<b>8,08</b>	<b>7,88</b>
<b>26.42 Altbau RL</b>	13,1	545	<b>8,16</b>	<b>8,10</b>
<b>26.44 Neubau VL</b>	11,9	533	8,38	0,05
<b>26.44 Neubau RL</b>	13,9	532	8,30	0,76
<b>26.14 ENB VL</b>	12,0	532	8,40	0,02
<b>26.14 ENB RL</b>	14,2	532	8,32	0,01
<b>26.24 ENB RL</b>	14,0	531	8,36	0,35

Die vor Ort gemessenen Temperaturen lagen im Kaltwassersystem zwischen 10,5 °C im Vorlauf der Technik-Zentrale 2 und 19,4 °C im Rücklauf des Altbaus 25.41.

Die Bestimmung der Sauerstoffkonzentration ergab dabei einen Wert von 7,95 mg/l O<sub>2</sub> im Nachspeisewasser. Im Kreislaufwasser wurden für den Großteil der Proben sehr geringe Sauerstoffgehalte zwischen 0,01 und 0,76 mg/l O<sub>2</sub> gemessen. Ein gegenüber dem Nachspeisewasser deutlich geringerer Sauerstoffgehalt im Kreislaufwasser zeigt an, dass ein (zumindest weitgehend) geschlossener Kreislauf vorliegt, in dem kein nennenswerter anderweitiger Sauerstoffzutritt vorliegt.

Drei Kreislaufwasserproben enthielten jedoch zwischen 7,88 und bis 9,30 mg/l O<sub>2</sub>. Es ist nicht auszuschließen, dass die höheren Sauerstoffgehalte auf die Bedingungen an der jeweiligen Probenahmestelle zurückzuführen sind. Dies lässt sich für die Probenahmestelle Technik-Zentrale 21.01 Rücklauf, bei welcher es sich um die Entlüftung der Kältemaschine 3 handelte, auf

diese Weise z. T. erklären. Dort kam es bei der Probenahme im schnell fließenden Wasser zu einem Luftzutritt. Gleiches gilt für die beiden Probenahmestellen in den Altbauten, welche ebenfalls höhere Sauerstoffgehalte aufwiesen. Sauerstoff kann generell in atmosphärisch offenen Anlagen vorkommen, unvermeidbar z. B. wenn Kälteverbraucher zur Atmosphäre hin offen sind. Für die Altbauten sollte überprüft werden, dass der Sauerstoffeintrag in das Kreislaufsystem nicht durch mangelhafte Druckhaltung oder diffusionsoffene Materialien verursacht ist, da (unkontrollierter) Sauerstoffeintritt im System zu verstärkter Korrosion und nachgelagert auch verstärkter Bildung von Partikeln führen kann. Zuletzt können höhere Sauerstoffkonzentrationen auch durch eine kurz vor Probenahme erfolgte Nachspeisung mit sauerstoffhaltigem Nachspeisewasser bedingt sein.

Die meisten Kaltwasserproben weisen einen pH-Wert zwischen 8,3 und 8,4 auf. An den drei Probenahmestellen im Kaltwasser mit hohen Sauerstoffgehalten ließ sich zudem ein geringfügig niedrigerer pH-Wert unter 8,2<sup>1</sup> bestimmen, der auch durch die Probenahme beeinflusst sein kann sowie eine etwas höhere elektrische Leitfähigkeit als in den sauerstoffarmen Proben.

Für das Gesamtsystem liegt eine erhöht salzhaltige Betriebsweise gemäß Richtlinie VDI/BTGA 6044 vor. Im Vergleich zu den Analysenergebnissen der Technik-Zentrale 1 (Rücklauf) aus den Jahren 2016 bis 2021 lässt sich feststellen, dass sich die Leitfähigkeit auf einem ähnlichen Niveau um 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$  befindet wie im Jahr 2021. Die Kreisläufe des Neubaus und des Ersatz-Neubaus, welche im Jahr 2021 Leitfähigkeiten zwischen 466 und 497  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aufwiesen, liegen nunmehr in einem höheren Bereich um 530  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Die Leitfähigkeiten der neuen Gebäude nähern sich den Werten der Technik-Zentrale 1 somit an. Gleichzeitig sind die pH-Werte in den neuen Gebäuden seit 2021 gesunken, so dass die vormals deutlichen Unterschiede zwischen Technik-Zentrale 1 einerseits und Technik-Zentrale 2 und neue Gebäude andererseits sich ebenfalls verringern.

### 3.2 Ergebnisse der anorganisch-chemischen Analyse

Die Wasserproben wurden hinsichtlich ausgewählter korrosionschemisch relevanter Parameter untersucht. Die Analysenergebnisse sind im Vergleich zum Düsseldorfer Trinkwasser (offizielle Trinkwasseranalyse 2025, Stadtwerke Düsseldorf AG), das als ursprüngliches Füllwasser des Kreislaufs und als Nachfüllwasser verwendet wurde, in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt.

---

<sup>1</sup> Der pH-Wert in Kaltwassersystemen sollte gemäß VDI/BTGA 6044 zwischen 8,2 und 10,0 bzw. 8,2 und 9,0 bei Vorhandensein von Aluminiumlegierungen liegen, damit sich stabile Deckschichten auf den Werkstoffoberflächen bilden können.

Die Aufteilung auf zwei Tabellen ermöglicht eine übersichtlichere Darstellung der Ergebnisse.  
„**Fett**“ markierte Werte entsprechen in den beiden folgenden Tabellen Abweichungen von den Richtwerten der VDI/BTGA 6044.

**Tabelle 2: Wasseranalysen der Proben vom 12.06.2025, korrosionschemisch relevante Parameter; Teil 1**

Probe		21.01 TZ 1	25.41	26.42	21.01 TZ 1	Trink-
		RL	Altbau RL	Altbau RL	Nachspei-	wasser
Parameter	Einheit				sung	2025
Temperatur	°C	11,9	19,4	13,1	13,0	14,0
El. Leitfähigkeit (25°C)	µS/cm	544	542	545	702	685
pH-Wert	-	8,24	<b>8,15</b>	<b>8,14</b>	<b>7,55</b>	<b>7,49</b>
Karbonathärte	°dH	7,56	7,56	7,56	10,10	15
Gesamthärte	°dH	<b>9,50</b>	<b>9,45</b>	<b>9,55</b>	<b>14,30</b>	<b>15,00</b>
Summe Erdalkalien	mmol/l	<b>1,69</b>	<b>1,69</b>	<b>1,70</b>	<b>2,56</b>	<b>2,65</b>
Calcium	mg/l	49,8	49,5	50,1	83,9	84,1
Magnesium	mg/l	10,9	11,0	11,0	11,3	11,7
Natrium	mg/l	37,2	36,9	37,1	37,2	36,2
Kalium	mg/l	4,12	4,01	4,04	4,04	3,87
Basekapazität $K_{B8,2}$	mmol/l	0,00	0,01	0,01	0,21	0,14
Säurekapazität $K_{S4,3}$	mmol/l	2,70	2,70	2,70	3,61	3,71
Calcitlösekapazität	mg/l	-8,5	-9,5	-6,5	-4,4	-6,5
TOC	mg/l	0,60	0,45	1,20	0,41	0,29
Chlorid	mg/l	<b>69,8</b>	<b>69,8</b>	<b>69,9</b>	<b>71,7</b>	<b>63,5</b>
Nitrat	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	13,6	12,8
Sulfat	mg/l	32,4	32,1	32,5	59,5	52,2
Phosphat	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	0,1
Silikat	mg/l	3,25	3,17	3,44	7,60	n. v.
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	n. n.	n. n.	12	n. v.	n. v.
Absetzbare Stoffe	ml/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. v.	n. v.
Anionenquotient $S_1$	-	0,98	0,98	0,98	0,96	0,83
Sättigungs-Index LSI	-	0,32	0,38	0,39	0,22	n. v.
Sättigungs-Index RSI	-	7,49	7,32	7,38	7,22	n. v.

n. n. = "nicht nachweisbar"; die Konzentration liegt unterhalb der Nachweisgrenze des Analysenverfahrens.

n. v. = "nicht verfügbar"; es liegen keine Daten vor.

**Tabelle 3: Wasseranalysen der Proben vom 12.06.2025, korrosionschemisch relevante Parameter; Teil 2**

Probe		26.51 TZ 2	26.51 TZ 2	26.44	26.44	26.14 ENB	26.14 ENB	26.24 ENB
Parameter		VL	RL	Neubau	Neubau	VL	RL	RL
Einheit				VL	RL			
Temperatur	°C	10,5	13,7	11,9	13,9	12,0	14,2	14,0
El. Leitfähigkeit (25°C)	µS/cm	528	528	529	531	530	529	530
pH-Wert	-	8,25	8,20	8,22	8,20	8,24	8,24	8,23
Karbonathärte	°dH	7,11	7,17	7,11	7,11	7,09	7,09	7,11
Gesamthärte	°dH	<b>8,72</b>	<b>8,79</b>	<b>8,60</b>	<b>8,77</b>	<b>8,82</b>	<b>8,80</b>	<b>8,76</b>
Summe Erdalkalien	mmol/l	<b>1,55</b>	<b>1,57</b>	<b>1,53</b>	<b>1,56</b>	<b>1,57</b>	<b>1,57</b>	<b>1,56</b>
Calcium	mg/l	44,3	44,6	43,7	44,5	44,8	44,7	44,5
Magnesium	mg/l	10,9	11,0	10,8	11,0	11,0	11,0	11,0
Natrium	mg/l	38,2	38,4	37,4	38,3	38,3	38,3	38,3
Kalium	mg/l	4,17	4,22	4,00	4,13	4,15	4,18	4,11
Basekapazität $K_{B8,2}$	mmol/l	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Säurekapazität $K_{S4,3}$	mmol/l	2,54	2,56	2,54	2,54	2,53	2,53	2,54
Calcitlösekapazität	mg/l	-6,2	-5,9	-6,2	-5,8	-6,6	-7,1	-7,0
TOC	mg/l	0,53	0,57	0,51	0,61	0,54	0,56	0,57
Chlorid	mg/l	<b>72,7</b>	<b>72,7</b>	<b>72,6</b>	<b>72,6</b>	<b>72,9</b>	<b>72,7</b>	<b>72,9</b>
Nitrat	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Sulfat	mg/l	26,8	26,9	26,8	26,7	26,9	26,9	26,9
Phosphat	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Silikat	mg/l	3,31	4,61	3,44	3,76	4,32	4,53	3,78
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	12	43	17	16	20	20	18
Absetzbare Stoffe	ml/l	0,20	0,25	0,25	0,30	0,20	0,20	0,20
Anionenquotient $S_1$	-	1,03	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Sättigungs-Index LSI	-	0,47	0,49	0,43	0,55	0,49	0,56	0,48
Sättigungs-Index RSI	-	7,42	7,34	7,44	7,28	7,38	7,28	7,36

n. n. = "nicht nachweisbar"; die Konzentration liegt unterhalb der Nachweisgrenze des Analysenverfahrens.

n. v. = "nicht verfügbar"; es liegen keine Daten vor.

Die Neutralsalzgehalte (Chlorid, Sulfat, Nitrat) beeinflussen die korrosionschemischen Eigenschaften des Trinkwassers maßgeblich bzw. treiben die Korrosion des Werkstoffes voran. Die korrosionschemischen Zusammenhänge werden üblicherweise durch den Neutralsalzquotienten  $S_1$  beschreiben, der aus den molaren Konzentrationen berechnet wurde nach:

$$S_1 = \frac{[Cl^-] + 2 \times [SO_4^{2-}] + [NO_3^-]}{[HCO_3^-]} \quad (1)$$

Der Neutralsalzquotient  $S_1$  zeigt eine erhöhte Neigung zu lokalen Korrosionsprozessen für un- und niedriglegierte Stahlwerkstoffe an, wenn  $S_1 > 1$ . Für das vorliegende Kaltwasser ergaben sich aufgrund des Anionenverhältnisses im Einspeisewasser, welches bereits einen Neutralsalzquotienten  $S_1$  nahe 1,0 aufwies, entsprechende Werte in den Vor- und Rückläufen der Technik-Zentralen und Gebäude ( $S_1 = 0,98$  bis  $1,03$ ), wonach davon auszugehen ist, dass bei aktueller Wasserbeschaffenheit eine gewisse Korrosionswahrscheinlichkeit zu erwarten ist.

Der Langelier-Sättigungsindex LSI berechnet sich nach Gleichung (2)

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad (2)$$

und der Ryznar-Sättigungsindex RSI nach Gleichung (3)

$$\text{RSI} = 2 \text{ pH}_s - \text{pH} \quad (3)$$

beide mit  $\text{pH}$  = pH-Wert bei Bewertungstemperatur (Wassertemperatur vor Ort)

$\text{pH}_s$  = pH-Wert bei Calcitsättigung, in dessen Berechnung die Werte für Leitfähigkeit, Säurekapazität, Calciumgehalt und Temperatur eingehen.

Anzumerken ist, dass die Bewertung für Wässer ohne Zusatz von Wasserbehandlungschemikalien (z. B. Korrosionsinhibitoren oder Dispergiermittel) gilt. Eine grobe Einteilung zur Bewertung der Indizes LSI und RSI ist in Tabelle 4 aufgeführt.

**Tabelle 4: Bewertungsskala für Langelier- und Ryznar-Index**

LSI	RSI	Interpretation
Langelier Sättigungsindex	Ryznar Sättigungsindex	
>> 0,4	<< 6	Steigende Belagsbildung, sinkendes Korrosionsrisiko
um 0 ( $\pm 0,4$ )	um 6	Belagsbildung ohne Schutzwirkung, gesättigtes Wasser
<< - 0,4	>> 7	Steigende Korrosionsneigung, Lösung des Calcitbelags
<< -2	>> 8	Starke Korrosion an un- und niedriglegiertem Stahl

Nach diesen Modell-Berechnungen zeigen sich für das Kaltwasser der Beprobung vom 12.06.2025 uneinheitliche Ergebnisse. Der Langelier-Sättigungsindex LSI zeigt mit Werten zwischen 0,22 und 0,56 ein gesättigtes System mit Belagsbildung ohne Schutzwirkung bzw. ein geringfügiges Risiko zur Bildung von Belägen an. Dagegen zeigt der Ryznar-Sättigungsindex RSI mit Werten zwischen 7,22 und 7,49 eine deutliche Neigung zur Calcitlösung mit moderatem Korrosionsrisiko an. Dieser scheinbare Widerspruch ist in den Berechnungsmodalitäten der Rechenmodelle begründet. Die Modelle sind als Tendenz-liefernde Berechnungen aber dennoch anwendbar und gebräuchlich. Zusammengefasst bedeutet dies für Korrosionsprozesse, dass sie nicht ganz auszuschließen sind.

Die deutlich negativen Werte der (mit einem Rechenmodell für natürliche Wässer berechneten) Calcitlösekapazität in allen Proben weisen – unter der Annahme der Übertragbarkeit des Rechenmodells auf Kreislauf-Betriebswässer – auf Eigenschaften des Wassers hin, die eine Abscheidung von Calcit fördern. Dadurch kann einerseits aufgrund der Unterstützung der Deckschichtbildung einer Korrosionsneigung entgegengewirkt werden, andererseits kann jedoch die verstärkte Einlagerung von Calciumcarbonat in die Deckschicht auch zur Verminderung der Deckschichtgüte durch Ausbildung poröserer Strukturen führen.

Die Analysenergebnisse des Umlaufwassers zeigen gegenüber dem ursprünglich als Füllwasser verwendeten Trinkwasser eine geringere Salzfracht, die in der Einlagerung von ionischen Reaktionsprodukten in die Deckschichten der Metallwerkstoffe begründet sein kann. Wie schon in den vorangegangenen Beprobungen, lässt sich ein verringerter Calciumgehalt und eine geringere Säurekapazität (entspricht dem Gehalt an Hydrogencarbonat) im Umlaufwasser gegenüber dem Nachspeisewasser beobachten. Im Hinblick auf die Technik-Zentrale 2, den Neubau und die Ersatz-Neubauten gleichen sich die Werte denen der Technik-Zentrale 1 (Altsystem) an.

Zur möglichen Interpretation weiterer Unterschiede zwischen Nachspeisewasser und Kreislaufwasser lässt sich sagen, dass die geringfügige Abnahme der Leitfähigkeit des Kreislaufwassers gegenüber dem Nachspeisewasser mit der Abnahme der Ionen Nitrat und Sulfat bei konstanten Chloridgehalten einhergeht. Eine mögliche Erklärung dafür – über die natürliche Schwankungsbreite des in Düsseldorf verteilten Trinkwassers hinaus – wäre die Anwesenheit von sulfatreduzierenden und nitratreduzierenden Bakterien.

Hinzu kommt ein Deckschichtaufbau an den Innenwandungen der Leitungen unter Verbrauch von Sauerstoff aus dem Medium (Wasser), Metallionen aus dem Werkstoff und Einlagerung von Reaktionsprodukten. Der Prozess wird begleitet vom Anstieg des pH-Wertes, wie auch hier zwischen Füllwasser und Kreislaufwasser beobachtet wurde. Außerdem wirkt der Abbau der Kohlensäure im Kreislaufwasser zusätzlich häufig alkalisierend.

Im TOC-Wert sind, mit einer Ausnahme (Altbau 26.42 RL), keine nennenswerten Veränderungen erkennbar.

Die erhebliche Menge an abfiltrierbaren Stoffen in den meisten Proben, mit Ausnahme des Vorlaufs der Technik-Zentrale 1 und des Rücklaufs des Altbaus 25.41, zeigt die nach wie vor vorhandene signifikante Partikelfracht innerhalb des Kaltwassersystems, die nunmehr auch die

im Jahr 2021 noch unbelasteten Neubauten betrifft. Die Ergebnisse weisen auf deutliche Ansammlungen von Korrosionsprodukten in weiten Teilen des Kaltwassersystems hin. Dies wird durch die Analyse der Werkstoff-bürtigen Metall-Ionen bestätigt (Tabelle 5 und Tabelle 6). Absetzbare Stoffe wurden nur im Kaltwasser der Technik-Zentrale, des Neubaus und der Ersatz-Neubauten in kleinen Mengen bestimmt.

Die Ergebnisse der Werkstoff-bürtigen Metall-Ionen (Eisen, Kupfer, Mangan, Aluminium, Zink, Chrom, Nickel und Molybdän) sind nachfolgend dargestellt. Zur Unterscheidung von im Wasser gelösten Metall-Ionen und an Partikel gebundenen Metall-Ionen im Kreislaufwasser wurden sowohl das Filtrat der Wasserproben als auch zuvor abgetrennte ungefilterte Probenmengen analysiert. Neben den Metallen wurde auch Silikat, welches im Trinkwasser natürlicherweise vorkommt, in partikulärer Form nachgewiesen, so dass dieses in die Darstellung aufgenommen wurde. Die Probe des Nachspeisewassers wurde nicht gefiltert, da davon ausgegangen wurde, dass partikelfrei nachgespeist wird.

Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigen die Analysenergebnisse mit Werten in signifikanter Größenordnung. Jeweils „**fett**“ markiert sind hohe Metall-Gehalte, z. T. mit Überschreitung der Richtwerte der VDI/BTGA 6044 für Eisen ( $< 0,5 \text{ mg/l}$ ) sowie für Kupfer, Zink und Aluminium (je  $< 0,2 \text{ mg/l}$ ).

Die Analysenergebnisse für die Nachspeisung, die Technik-Zentrale 1 und die beiden Altbauten zeigen insgesamt (Tabelle 5):

- Das Metall Mangan konnte in geringen Mengen im Kreislaufwasser nachgewiesen werden (max.  $0,033 \text{ mg/l}$ ), aber nicht im Nachspeisewasser. Es lag größtenteils partikulär vor.
- Das in den vier genannten Proben in ebenfalls geringen Konzentrationen nachgewiesene Kupfer stammt aus den Kupferrohren bzw. den verbauten Messingwerkstoffen. Das an einer Probenahmestelle nachgewiesene Zink stammt wahrscheinlich aus Messingwerkstoffen. Beide Metalle liegen in Form von Partikeln vor.
- Im Umlaufwasser sind in erster Linie erhöhte Eisengehalte deutlich oberhalb von  $0,5 \text{ mg/l}$  feststellbar, während im Nachspeisewasser kein Eisen oberhalb der Nachweisgrenze bestimmt werden konnte. Die Konzentrationen an Eisen lassen sich nach gelösten und partikulären Bestandteilen unterscheiden. Der überwiegende Anteil der Eisenkonzentrationen lag als ungelöste Partikelfracht im Wasser vor. Die Menge an gelösten Eisenbestandteilen, die ggf. Rückschlüsse auf aktive Korrosionsprozesse zulässt, verblieb in der Größenordnung unterhalb des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung, von  $0,200 \text{ mg/l}$ .

- Silizium (Si) bzw. sein Oxid Silikat ( $\text{SiO}_2$ ) stammt größtenteils aus dem Trinkwasser und aus verschiedenen Werkstoff-Legierungen (z. B. Aluminiumlegierungen). Es lag vorrangig gelöst vor, aber im Kreislaufwasser auch zu einem kleinen Anteil partikulär.
- Im Kreislaufwasser ist eine sehr geringe, aber messbare Menge an Molybdän – in gelöster Form nachweisbar, woraus auf eine (möglicherweise zu einem früheren Zeitpunkt durchgeführte) Zugabe eines Korrosionsinhibitors auf Molybdat-Basis oder auf Korrosionsprodukte von Edelstahl geschlossen werden kann.

**Tabelle 5: Analysen der Wasserproben vom 12.06.2025, Metall-Ionen; Teil 1**

Probe		21.01 TZ 1 Nachspei- sung	21.01 TZ 1 RL	25.41 Altbau RL	26.42 Altbau RL
Parameter	Einheit				
Eisen, gelöst	mg/l	n. n.	0,036	0,171	0,016
Eisen, partikulär	mg/l	n. n.	<b>1,878</b>	<b>1,412</b>	<b>3,945</b>
Eisen, gesamt	mg/l	n. n.	<b>1,914</b>	<b>1,583</b>	<b>3,961</b>
Kupfer, gelöst	mg/l	0,006	n. n.	n. n.	n. n.
Kupfer, partikulär	mg/l	0,040	0,021	0,013	0,034
Kupfer, gesamt	mg/l	0,046	0,021	0,013	0,034
Mangan, gelöst	mg/l	n. n.	0,027	0,024	0,026
Mangan, partikulär	mg/l	n. n.	0,002	0,001	0,007
Mangan, gesamt	mg/l	n. n.	0,029	0,025	0,033
Aluminium, gesamt	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Zink, gesamt	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	0,017
Chrom, gesamt	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Nickel, gesamt	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Molybdän, gelöst	mg/l	n. n.	0,007	0,007	0,007
Molybdän, partikulär	mg/l	0	0	0	0
Molybdän, gesamt	mg/l	n. n.	0,005	0,006	0,006
Silikat, gelöst	mg/l	8,02	3,16	3,13	3,14
Silikat, partikulär	mg/l	0	0,09	0,04	0,30
Silikat, gesamt	mg/l	7,60	3,25	3,17	3,44

n. n. = "nicht nachweisbar"; die Konzentration liegt unterhalb der Nachweisgrenze des Analysenverfahrens.

Für viele Metalle sind in der Technik-Zentrale 2 und in den Neubauten deutliche Unterschiede im Vergleich zur Technik-Zentrale 1 und den Altbauten erkennbar, die sich durch höhere Metallfrachten zeigen (Tabelle 6).

**Tabelle 6: Analysen der Wasserproben vom 12.06.2025, Metall-Ionen; Teil 2**

Probe		26.51 TZ 2 VL	26.51 TZ 2 RL	26.44 Neubau VL	26.44 Neubau RL	26.14 ENB VL	26.14 ENB RL	26.24 ENB RL
Parameter	Einheit							
Eisen, gelöst	mg/l	0,669	0,446	0,429	0,480	0,538	0,426	0,595
Eisen, partikulär	mg/l	4,350	9,076	6,375	6,808	8,451	8,972	6,620
Eisen, gesamt	mg/l	5,019	9,522	6,804	7,288	8,989	9,398	7,215
Kupfer, gelöst	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Kupfer, partikulär	mg/l	0,088	0,260	0,130	0,130	0,160	0,160	0,130
Kupfer, gesamt	mg/l	0,088	0,260	0,130	0,130	0,160	0,160	0,130
Mangan, gelöst	mg/l	0,079	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,079
Mangan, partikulär	mg/l	0,021	0,047	0,030	0,033	0,041	0,043	0,032
Mangan, gesamt	mg/l	0,100	0,125	0,108	0,111	0,119	0,121	0,111
Aluminium, gesamt	mg/l	0,193	0,504	0,212	0,277	0,407	0,463	0,284
Zink, gesamt	mg/l	0,012	0,020	0,012	0,018	0,014	0,015	0,012
Chrom, gesamt	mg/l	n. n.	0,0014	n. n.	n. n.	0,00066	0,00082	n. n.
Nickel, gesamt	mg/l	n. n.	0,0027	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Molybdän, gelöst	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Molybdän, partikulär	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Molybdän, gesamt	mg/l	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Silikat, gelöst	mg/l	2,47	2,43	2,43	2,45	2,45	2,45	2,44
Silikat, partikulär	mg/l	0,84	2,18	1,01	1,31	1,87	2,08	1,34
Silikat, gesamt	mg/l	3,31	4,61	3,44	3,76	4,32	4,53	3,78

n. n. = "nicht nachweisbar"; die Konzentration liegt unterhalb der Nachweisgrenze des Analysenverfahrens.

Die Analysenergebnisse für die Technik-Zentrale 2, den Neubau und die Ersatz-Neubauten zeigen insgesamt:

- Das Metall Mangan konnte in höheren Mengen in den Kaltwasserproben nachgewiesen werden (max. 0,125 mg/l). Es lag größtenteils partikulär vor, aber anteilig auch gelöst.
- In den sieben Proben wurde Kupfer in deutlich höheren Konzentrationen (bis max. 0,26 mg/l) nachgewiesen als in den älteren Teilen des Kaltwassersystems. Es kann z. B. aus Kupfer- und Kupferwerkstoffen stammen. Das an allen Probenahmestellen nachgewiesene Zink kann aus verschiedenen Werkstoffen (z. B. Kupfer-, Aluminiumlegierungen) an das Wasser abgegeben werden. Beide Metalle liegen in Form von Partikeln vor.
- Auch in der TZ 2 und in den Neubauten sind im Umlaufwasser in erster Linie erhöhte Eisengehalte deutlich oberhalb von 0,5 mg/l und deutlich oberhalb der Werte der TZ 1 und der Altbauten feststellbar. Der überwiegende Anteil der Eisenkonzentrationen liegt als ungelöste Partikelfracht im Wasser vor. Die Menge an gelösten Eisenbestandteilen, die ggf. Rückschlüsse auf aktive Korrosionsprozesse zulässt, liegt mit max. 0,669 mg/l deutlich über dem Niveau in der TZ 1 und den Altbauten

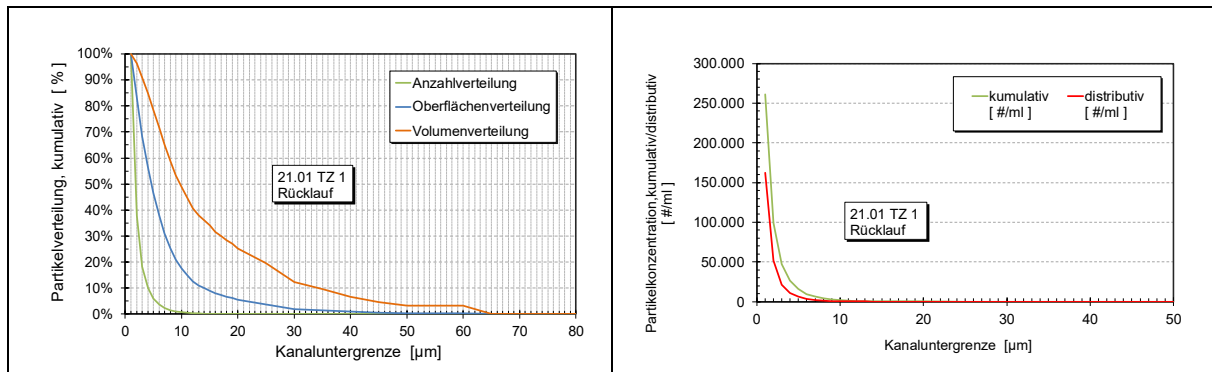
- Im Gegensatz zu den Altsystemen, in denen kein Aluminium nachweisbar ist, lässt sich Aluminium in seiner partikulären Form in erhöhten Konzentrationen (bis max. 0,504 mg/l) im Kaltwasser der TZ 2, des Neubaus und der Ersatz-Neubauten nachweisen.
- Unterschiede zum Altsystem lassen sich auch im Hinblick auf die Silikatgehalte aufzeigen. Hier sind die partikulären Anteile wesentlich höher. Wie bereits genannt sind Silikate natürlicherweise im Düsseldorfer Trinkwasser enthalten. Das partikuläre Silikat kann auch aus Aluminiumlegierungen ins Wasser eingetragen werden.
- Im Kreislaufwasser sind z.T. sehr geringe Mengen an partikulärem Chrom und Nickel nachweisbar, die aus Korrosionsprodukten von nichtrostendem Stahl oder Aluminiumwerkstoffen stammen könnten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Gesamtsystem der Hauptbestandteil im Hinblick auf Metalle Eisen ist. Für die TZ 2, den Neubau und die Ersatz-Neubauten sind die Eisenanteile etwas höher als in der TZ 1 und den Altbauten, hinzu kommen mit großem Abstand Aluminium, Kupfer und Mangan in den neuen Anlagenbereichen. Alle genannten Metalle stammen aus Korrosionsprodukten aus den eingebauten Rohrleitungs- und Armaturen-Werkstoffen. Der partikuläre Anteil der Metall-Ionen liegt für Eisen, Aluminium, Kupfer und Mangan bei Weitem höher als der gelöste Anteil. Die jeweiligen Metall-Konzentrationen unterscheiden sich nicht wesentlich in den Proben aus den Vor- und Rückläufen.

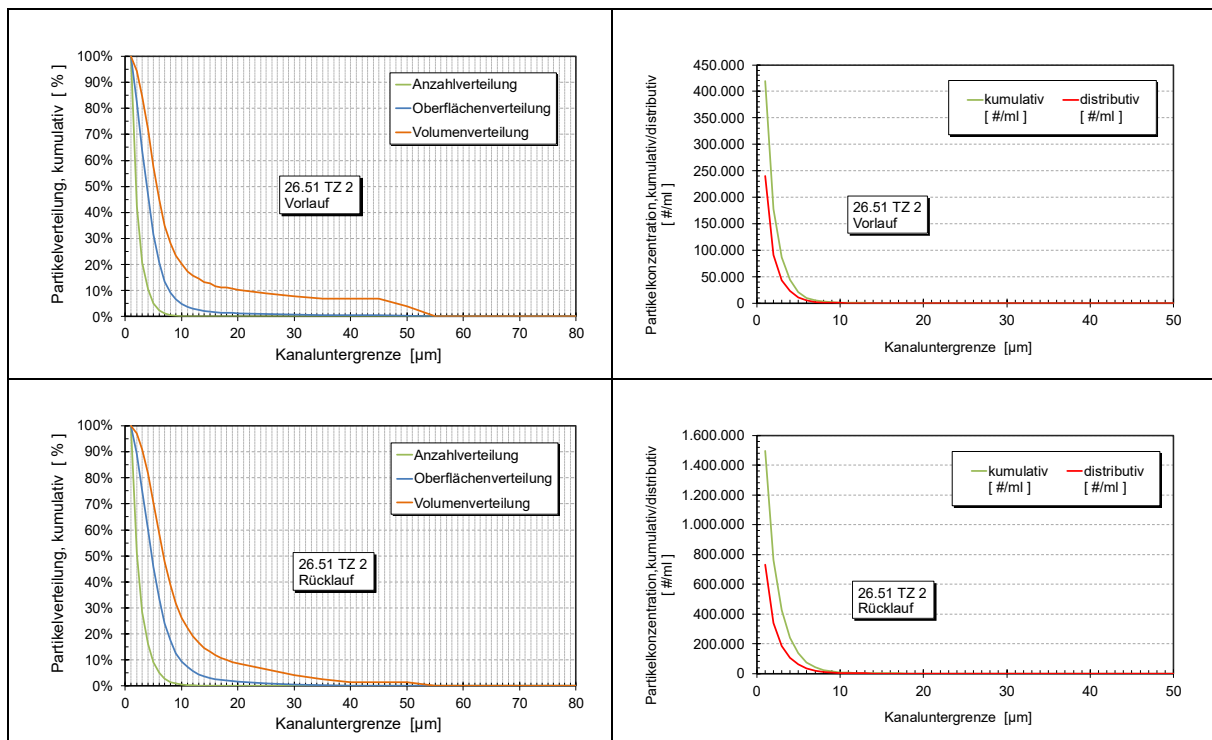
Partikuläre Metalle können sich unter Stagnationsbedingungen und in feingliedrigen Bauteilen auf Innenoberflächen ablagern, wodurch lokale Korrosionsprozesse (z. B. Bimetallkorrosion/galvanische Korrosion) verstärkt auftreten können. Zusätzlich kann es auch zur Verblockung von Ventilen oder ähnlichen hydraulischen Problemen kommen.

## 3.3 Ergebnisse der Partikeluntersuchung

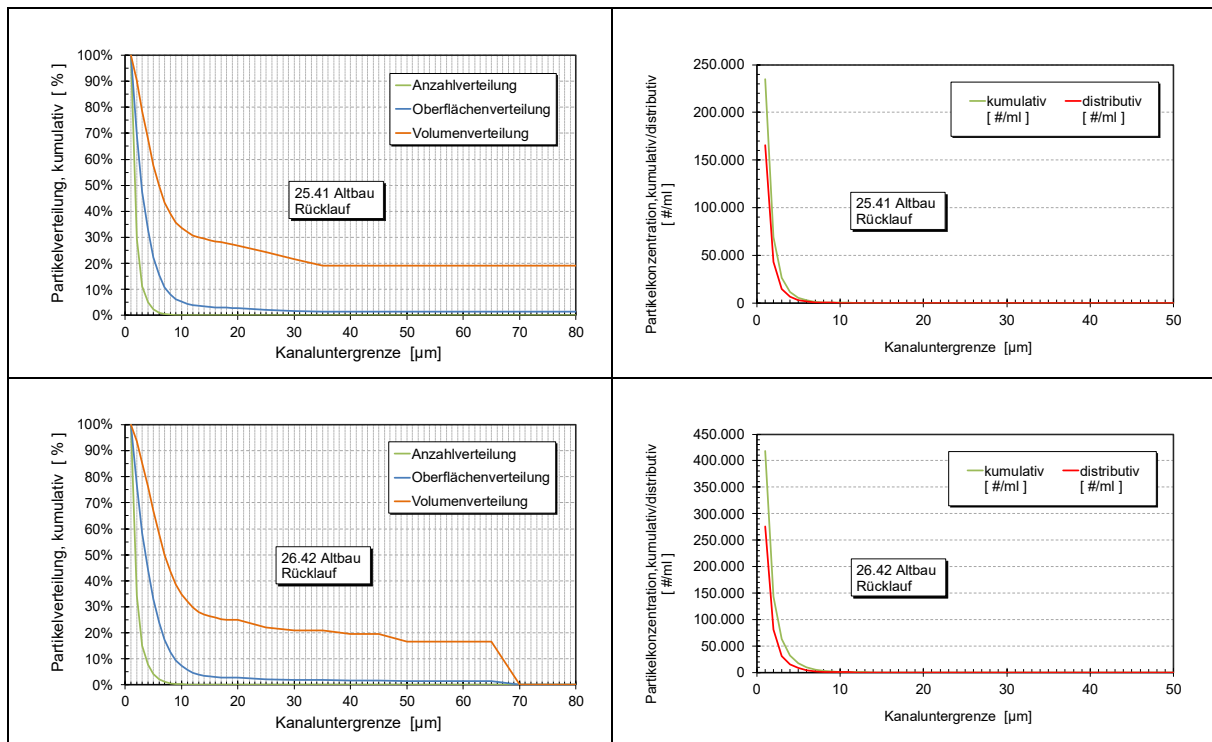
Zur Ermittlung der Partikelgrößen und der Verteilung in den einzelnen Wasserproben wurde das Messverfahren der Laserlichtblockade (Klotz: Abakus mobil) angewendet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den folgenden Diagrammen dargestellt (Abbildung 12 bis Abbildung 17).



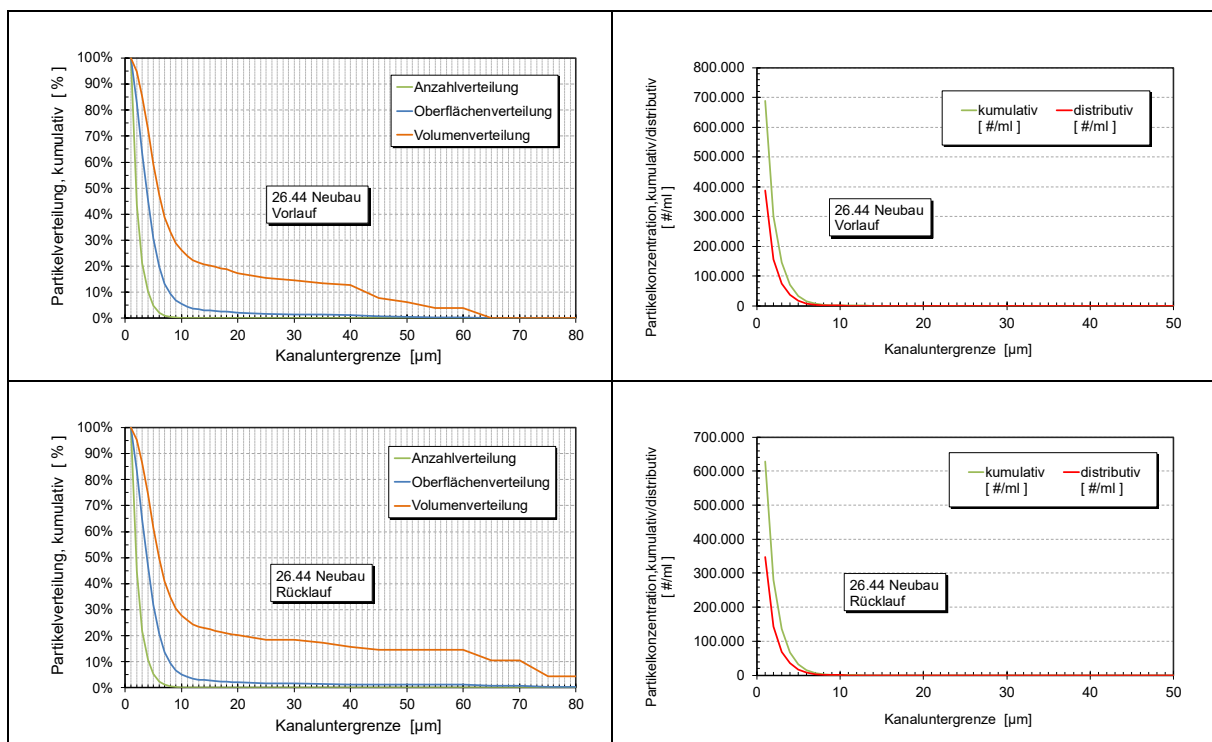
**Abbildung 12: Partikelmessungen Probe TZ 1 Rücklauf**



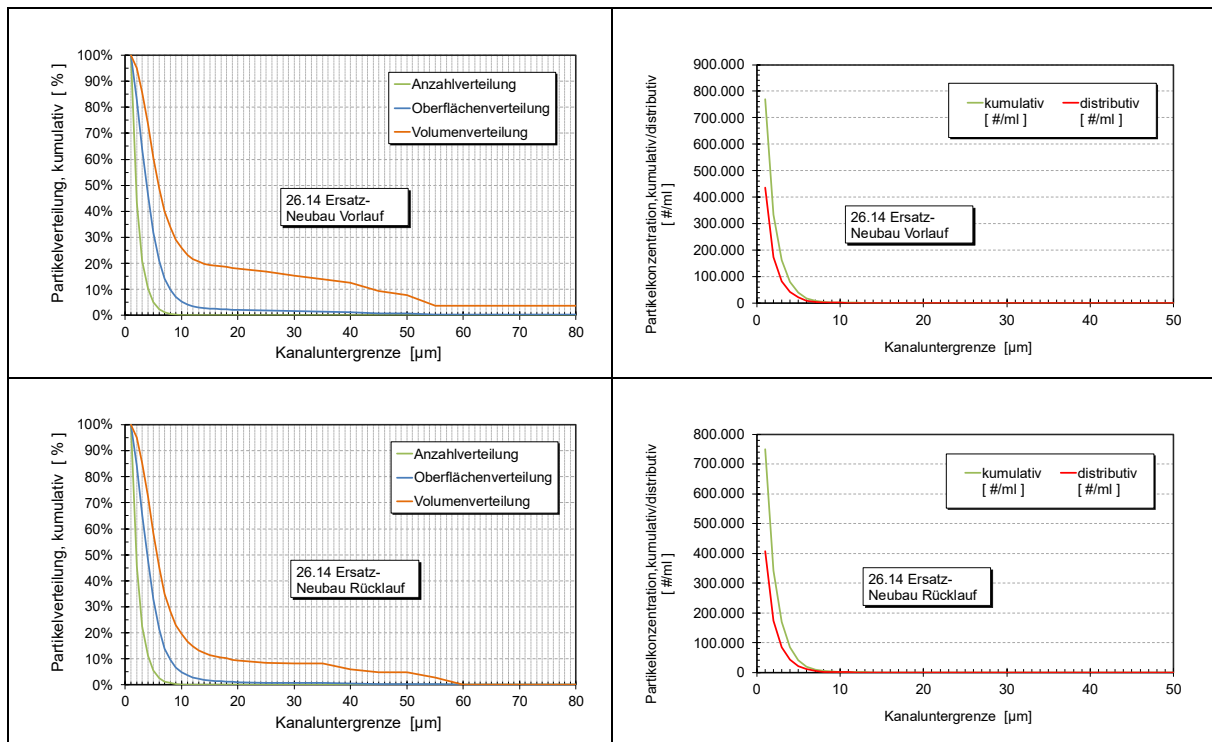
**Abbildung 13: Partikelmessungen Proben TZ 2 Vorlauf und Rücklauf**



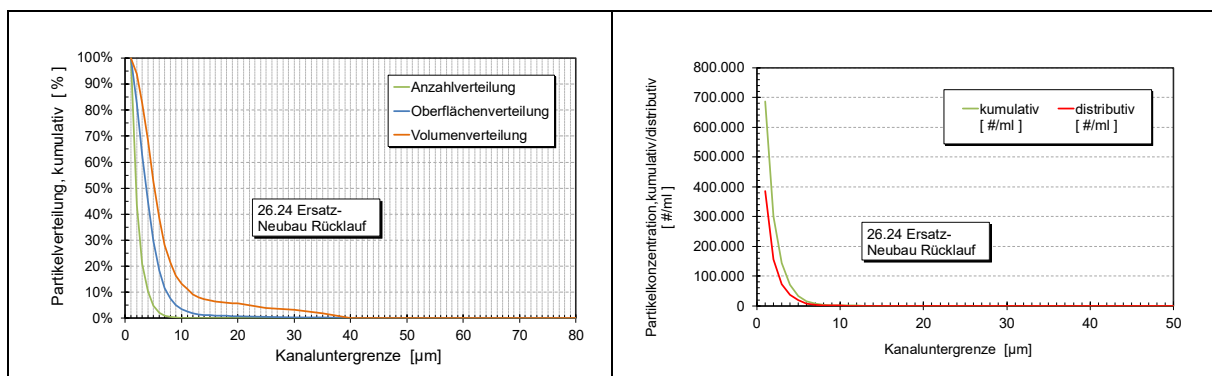
**Abbildung 14: Partikelmessungen Proben 25.41 Altbau Rücklauf und 26.42 Altbau Rücklauf**



**Abbildung 15: Partikelmessungen Proben 26.44 Neubau Vorlauf und Rücklauf**



**Abbildung 16: Partikelmessungen Proben 26.14 Ersatz-Neubau Vorlauf und Rücklauf**



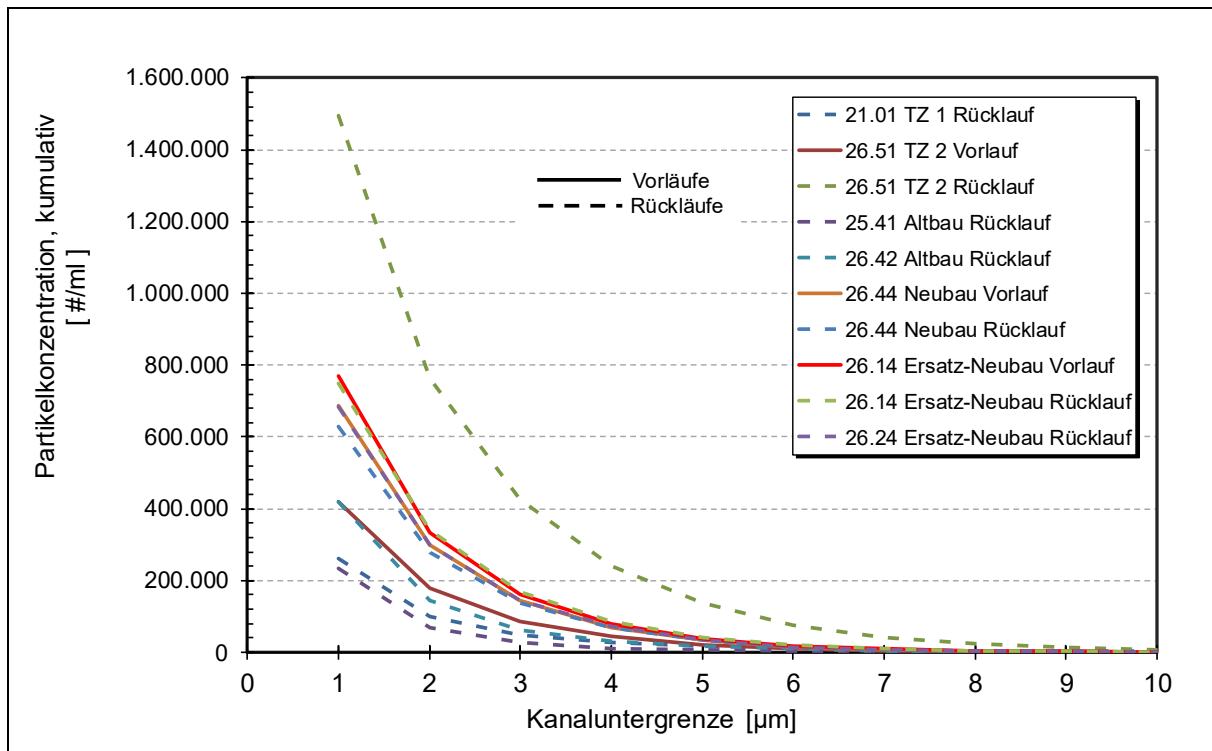
**Abbildung 17: Partikelmessungen Probe 26.24 Ersatz-Neubau Rücklauf**

Das jeweils linke Diagramm zeigt die prozentuale Verteilung aller Partikel einer Probe hinsichtlich der Anzahl (grüne Kurve), der Oberfläche (blaue Kurve) und des Volumens (rote Kurve), bezogen auf die Kanaluntergrenze in  $\mu\text{m}$  (auf der X-Achse), die die Partikelgröße angibt. Deutliche Unterschiede sind lediglich in der Volumenverteilung zu sehen, die Oberflächenverteilung folgt dem gleichen Trend. In der Probe aus dem Rücklauf des Altbaus 25.41 sind anteilig am meisten voluminöse Partikel über den gesamten Messbereich enthalten, die auch eine größere Oberfläche beanspruchen. Für alle Proben liegt beispielsweise der Anteil der voluminösen Partikel, die größer als  $20 \mu\text{m}$  im Durchmesser sind, auf einem Niveau zwischen etwa 10 und

30 %, wobei die Anteile der Partikel im Rücklauf der Technik-Zentrale 1 und im Bereich der Altbauten tendenziell mit etwa 25 % etwas höher sind als in der Technik-Zentrale 2 und in den Neubauten. Im Vergleich zu den jeweiligen Rückläufen sind die Partikelanteile in Bezug auf ihre Volumenverteilung in den Vorlaufproben geringfügig höher als in den Rücklaufproben. Bezogen auf die Gesamtzahl der Partikel in den Proben (siehe nächster Absatz, Betrachtung der kumulativen Partikelkonzentrationen der jeweils rechten Diagramme) relativiert sich diese Aussage jedoch wieder.

Das jeweils rechte Diagramm zeigt die Partikelkonzentrationen, also Anzahl pro Milliliter, bezogen auf die Kanaluntergrenze bzw. Partikelgröße [ $\mu\text{m}$ ]. Dabei sind in der grünen Kurve die Partikel aufaddiert (kumulativ), die rote Kurve (distributiv) gibt die Partikelanzahl auf einzelne Größen (im Abstand von 1  $\mu\text{m}$ ) an. Bei der Betrachtung ist zu berücksichtigen, dass die y-Achse der rechten Diagramme aufgrund der individuellen Partikelfracht in den einzelnen Proben unterschiedlich skaliert ist. Die mit Abstand höchste Partikelkonzentration wurde für den Rücklauf der Technik-Zentrale 2 mit ca. 1.500.000 Partikeln pro ml ermittelt. Im Vergleich zum Rücklauf der Technik-Zentrale 2 ließen sich im Kaltwassersystem des Neubaus 26.44 und der Ersatz-Neubauten 26.14 und 26.24 jeweils etwa halb so hohe Partikelkonzentrationen zwischen ca. 600.000 und 800.000 Partikel pro ml in den Vor- und Rückläufen bestimmen. Somit zeigen die Proben der Neubauten untereinander sehr ähnliche Partikelfrachten. Die niedrigsten Partikelkonzentrationen zwischen ca. 200.000 und 400.000 Partikeln pro ml wurden für die Rückläufe der erstmalig beprobten Altbauten, den Rücklauf der Technik-Zentrale 1 und den Vorlauf der Technik-Zentrale 2 festgestellt.

In der Auftragung der Konzentrationen über der Partikelgröße sind Partikel mit einem Durchmesser über 10  $\mu\text{m}$  kaum darstellbar. Die Gesamtheit der Partikel in allen zehn Proben, aufgetragen in Partikelkonzentration [Stück/ml] (kumulativ) über der Partikelgröße (Kanaluntergrenze) [ $\mu\text{m}$ ] wird in Abbildung 18 gezeigt.



**Abbildung 18: Partikelmessungen, gesamt**

Die durchgezogenen Linien der Kurven zeigen die Partikelkonzentrationen der Proben aus den beprobten Vorläufen, die gestrichelten Linien der Kurven die Partikelkonzentrationen der Rückläufe. Hier wird noch einmal verdeutlicht, dass im Vergleich der Proben sehr ähnliche Partikelgrößen vorliegen. In jeder Probe bestanden ca. 95 bis 99 % aus sehr kleinen Partikeln, die im Bereich zwischen der Kanaluntergrenze von 1 und 5 µm im Durchmesser detektiert wurden. Anhand der Übersicht der Partikelkonzentration aller Proben lässt sich die vorab beschriebene Reihenfolge nachvollziehen:

TZ 2 RL >> Neubau und Ersatz-Neubauten VL und RL > TZ 1 RL, TZ 2 VL, Altbauten RL

Unterschiede in der Partikelfracht sind mit Ausnahme des Rücklaufs der TZ 2 gering und die stark abfallenden Kurvenverläufe weisen in allen Proben auf eine recht harmonische Verteilung der Partikelgrößen hin, mit der deutlichen Mehrzahl an sehr kleinen Partikeln.

Die Unterschiede zwischen den Partikelverteilungen und Partikelgrößen der zehn Proben sind insgesamt als gering zu bezeichnen. Dies deutet darauf hin, dass sich die vormals unterschiedliche Partikelfracht (Partikel-Konzentration) angepasst hat, so dass die Verteilung im Gesamtkreislauf nun als homogen bezeichnet werden kann.

#### 4 Vergleich der Partikelergebnisse mit früheren Ergebnissen

Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass sich die Situation im Kreislaufwasser hinsichtlich der mitgeführten Partikelfracht im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Vorläufer-Projekten (2016 bis 2021) folgendermaßen entwickelt hat.

Die Partikelverteilung innerhalb der im Juni 2025 genommenen Proben lässt sich als gut zusammenfassend beschreiben. Die absoluten Partikelkonzentrationen zeigten, abhängig vom Probenahmeort, mit Ausnahme des Rücklaufs der TZ 2, eher geringe Unterschiede untereinander.

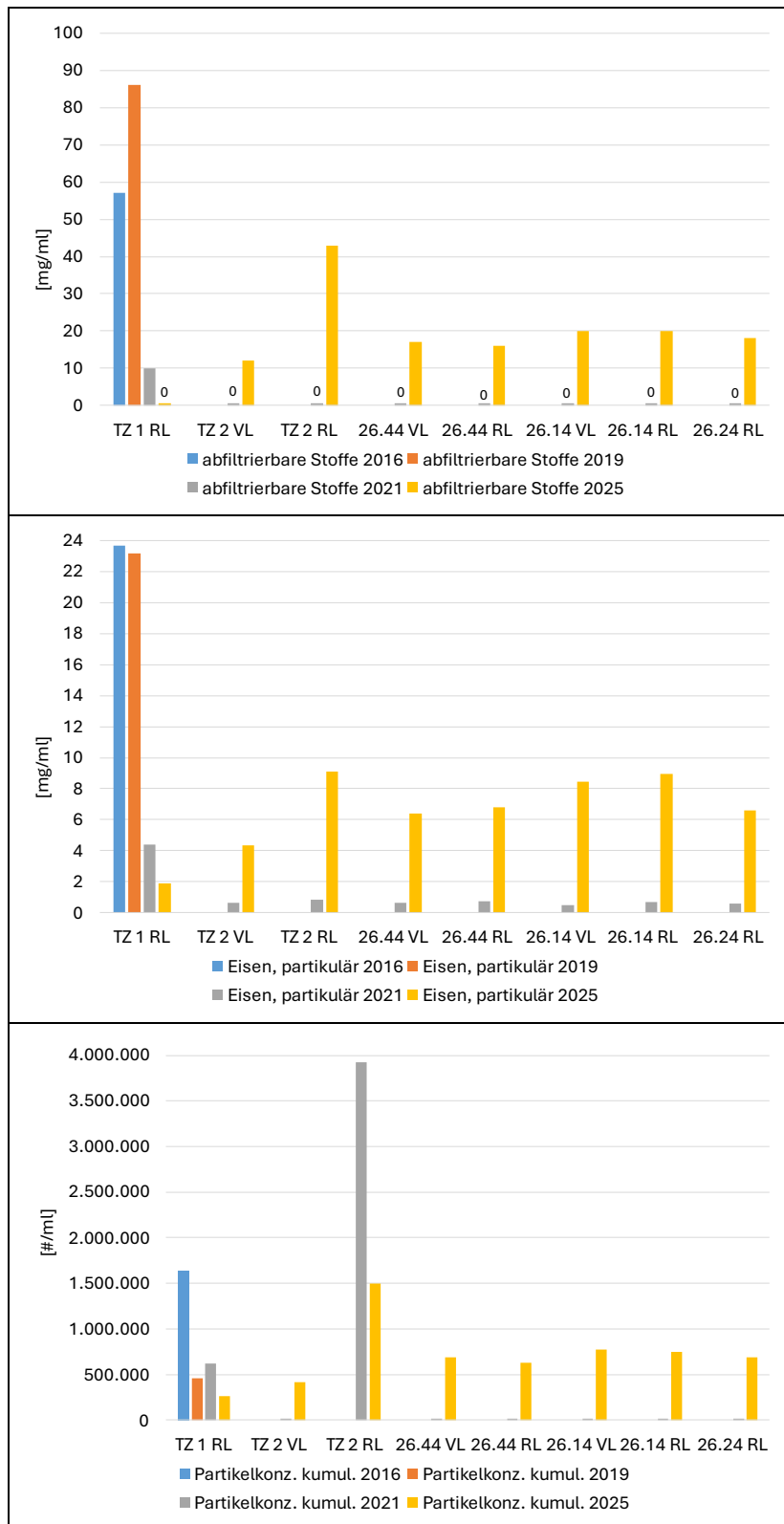
Mit der Schlammabildung im Kaltwassersystem direkt in Bezug zu bringen sind die folgenden Parameter:

- Abfiltrierbare Stoffe
- Eisengehalt, partikulärer Anteil
- Gesamtpartikelkonzentration, kumulativ

Aufgrund der in der diesjährigen Untersuchung getroffenen Auswahl der Probenahmestellen, die auf eine Beprobung in möglichst vielen (auch bisher nicht beprobten) Bereichen des Kaltwassersystems abzielte, ist ein direkter Vergleich zu den vorherigen Projektergebnissen für den Rücklauf der TZ 1 (Jahre 2016 bis 2025) sowie für den Rücklauf der TZ 2, den Neubau und die Ersatz-Neubauten (2021 und 2025) abbildbar (Abbildung 19).

Die Diagramme stellen den nunmehr deutlichen Rückgang der abfiltrierbaren Stoffe, Eisenpartikel und kumulierten Partikelkonzentrationen für den Rücklauf der Technik-Zentrale 1 graphisch dar. Anders sieht die Situation für die Technik-Zentrale 2, den Neubau und die Ersatz-Neubauten aus, hier sind an allen Probenahmestellen des Kaltwassersystems starke Anstiege der abfiltrierbaren Stoffe und der Eisenpartikel 2021 – 2025 festzustellen.

Dies stimmt auch für die gesamt-Partikelkonzentrationen, mit Ausnahme des Rücklaufs der TZ 2, für welchen die Partikelkonzentration gesunken ist. Die Partikel sind insgesamt etwas größer als im Jahr 2021.



**Abbildung 19: abfiltrierbare Stoffe, partikuläres Eisen und kumulierte Partikelkonzentration, Vergleich 2016 bis 2025**

Besonders auffällig ist der Anstieg der Partikelfrachten zwischen den im August 2021 und den aktuell durchgeführten Untersuchungen im Bereich des Neubaus und in den Ersatz-Neubauten. Im Detail stellt sich die Partikelbelastung so dar: Die im Jahr 2021 bestimmte Partikelfracht lag auf einem niedrigen Niveau unterhalb von 20.000 Partikeln pro ml; nunmehr ist mit ca. 600.000 bis 800.000 Partikeln pro ml ein hohes Niveau erreicht. Im Rücklauf der TZ 2 ist die Partikelfracht im Vergleich zum Jahr 2021 mäßig stark gesunken von vormals ca. 4.000.000 Partikel pro ml auf ca. 1.500.000 Partikel pro ml. Ein ähnlicher Trend ist für den Rücklauf der TZ 1 zu beobachten, für welchen die Partikelfracht von ca. 620.000 Partikel pro ml (2021) auf ca. 260.000 Partikel pro ml (2025) gesunken ist.

Insgesamt betrachtet ist die Partikelanzahl auch im Jahr 2025 als signifikant hoch zu bewerten, so dass in allen beprobten Bereichen eine sehr große Menge an mobilisierten Partikeln im Kreislauf-System befördert wird.