

Test verschiedener Maßnahmen zur Verhütung von Kalkablagerungen im Kühlsystem des Kernkraftwerks Grohnde

W. Czolkoss¹⁾, G. Jacobi²⁾, A. Schüler²⁾, W. Fichte³⁾

¹⁾ TAPROGGE GmbH, Wetter

²⁾ Gemeinschaftskernkraftwerk Grohnde GmbH

³⁾ vormals Allianz Zentrum für Technik, Ismaning

Kurzfassung

Im Kühlsystem des Kernkraftwerks Grohnde kommt es seit mehreren Jahren zu starken Kalkausfällungen im Turbinenkondensator und im Kühlturm, insbesondere während eng begrenzter Zeiträume im Frühjahr. Sie verursachen Leistungsverluste und hohe Reinigungskosten. Ursachen der verstärkten Kalkabscheidung sind offenbar die ökologisch verbesserte Wasserqualität der Weser sowie spezifische Betriebsbedingungen des Kühlsystems (Teilrückführung des Kühlwassers).

Gezielte Analysen von Meßdaten der Betriebsüberwachung und der Weser sowie Ablagerungsanalysen sollen die auslösenden Faktoren der Kalkabscheidung klären.

In einer für diesen speziellen Fall gebauten Versuchseinrichtung werden die kühlwasserseitigen Verhältnisse im Turbinenkondensator genau simuliert. In 6 beheizten Testrohren kann die Kalkbildung beobachtet und verschiedene Gegenmaßnahmen parallel erprobt werden.

Ziel ist die Klärung der Kalkabscheidevorgänge und die Entwicklung ökologisch und ökonomisch optimierter Gegenmaßnahmen. Die chemische Betriebsüberwachung hat dabei besondere Bedeutung zur Erkennung der kalkabscheidenden Bedingungen und zum gezielten Einsatz von Gegenmaßnahmen.

1 Das Kühlsystem des Kernkraftwerks Grohnde

Das Kernkraftwerk Grohnde ist eine Gemeinschaftseinrichtung der E.ON Kernkraft GmbH und der Gemeinschaftskraftwerk Weser GmbH. Es ist mit einem Druckwasserreaktor ausgerüstet und verfügt über eine elektrische Nettoleistung von 1430 MW. Seit der Inbetriebnahme 1984 hat das Kernkraftwerk Grohnde eine durchschnittliche Zeitverfügbarkeit von 92,5 % erreicht. Es nimmt damit eine Spitzenposition im internationalen Vergleich aller Druckwasser-Reaktoren ein.

Der Turbinenkondensator hat 6 getrennte Kühlwasserstränge. Er hat insgesamt 72500 Rohre aus Titan, Außendurchmesser 23 mm, Wandstärke 0,7 mm, Länge 13,8 m. Jeder der 6 Stränge hat eine eigene ungeregelte Kühlwasserpumpe. Die Kühlwassergeschwindigkeit in den Rohren beträgt 1,8 m/s, die Aufheizung bei Vollast 12 K.

Das benötigte Kühlwasser wird der Weser entnommen und nicht chemisch behandelt. Es kann über 2 Naturzug-Naßkühltürme geführt werden. In Abhängigkeit von der Wasserführung und der Temperatur der Weser sind drei verschiedene Kühlverfahren möglich:

Frischwasserkühlung wird bei ausreichender Wasserführung und niedriger Temperatur genutzt. Das Kühlwasser wird unter Umgehung der Kühltürme direkt wieder in die Weser zurückgeführt. Ihre Aufheizung ist auf 3 K begrenzt.

Ablaufkühlung wird bei höheren Temperaturen erforderlich. Dabei wird das ablaufende Kühlwasser über die Kühltürme geführt.

Mischkühlung wird bei niedriger Wasserführung angewendet. Dabei wird ein Teil des ablaufenden Kühlwassers hinter den Kühltürmen dem zulaufenden Kühlwasser zugemischt und damit im Kreislauf gefahren.

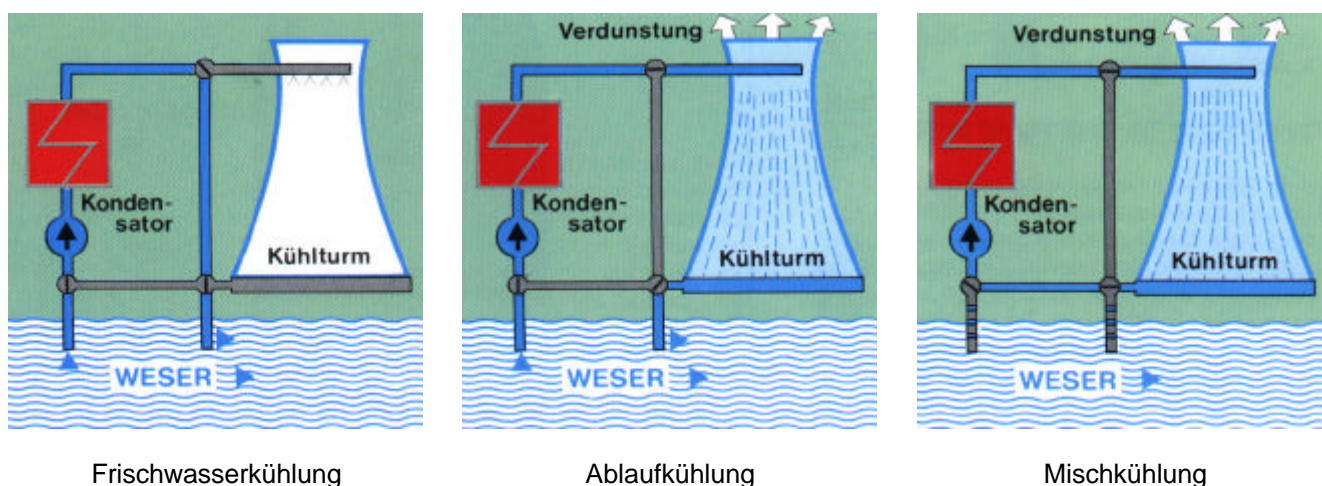


Bild 1: Die 3 Kühlverfahren des Kernkraftwerks Grohnde

Der Kühlwasserbedarf für den Turbinenkondensator und die Nebenkühlsysteme beträgt $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Durch die inzwischen erhobenen Gebühren („Wasserpennig“) von derzeit $0,02 \text{ DM}/\text{m}^3$ entstehen Kosten von etwa 16 Millionen DM pro Jahr. Um die Wasserentnahme aus der Weser zu vermindern, wird angestrebt, in Zukunft mehr Mischkühlung zu fahren.

2 Auftreten von Kalkablagerungen

Die Weser war bis etwa 1990 sehr stark belastet durch die hohe Salzfracht der Werra aus dem Kalibergbau in ihrem Einzugsgebiet. Durch Stilllegungen und Umweltschutzmaßnahmen ist diese Belastung erheblich zurückgegangen, was zu einer deutlichen Verbesserung der Wasserqualität in ökologischer Hinsicht führte.

Analyse	1989	2000
Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	6500 (1000-15000)	1900 (600-3300)
pH-Wert	7,9 (7,3-8,9)	8,1 (7,6-9,1)
m-Wert [mval/l]	2,1-3,3	2,5-3,3
Chlorid [ppm]	1500-2500	300-500
Calcium [ppm]	70-120	70-100

Tabelle 1: Typische Analysedaten der Weser 1989 und 2000

Durch die Verminderung des Salzgehaltes und den Anstieg des pH-Wertes hat das Kühlwasser bei höheren Temperaturen eine Tendenz zur Kalkabscheidung bekommen, die es früher nicht hatte. Bei der Revision 1994 wurden zum erstenmal Calciumcarbonatbeläge in den Rohren des Turbinenkondensators und auch im Kühlturm festgestellt. Die Beläge in den Kondensatorrohren ließen sich durch Hochdruckreinigungen während der Revisionen nur mit unterschiedlichem Erfolg entfernen. Durch den Einsatz von abrasiven Reinigungskugeln mit Korundbeschichtung in der TAPROGGE-Anlage ließen sich die Beläge nicht vollständig abtragen, da sie sich als extrem hart und festhaftend erwiesen.

1995 wurde ein Überwachungssystem CMS (Condenser Monitoring System) der Firma TAPROGGE am Turbinenkondensator installiert. Neben der genauen Kontrolle des Umlaufs und des Verschleißes der Reinigungskugeln wird auch der Wärmedurchgang an einzelnen Kondensatorrohren bestimmt. Beim Entstehen von Ablagerungen in diesen Rohren verändert sich das Verschleißverhalten der Reinigungskugeln und der Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert) sinkt. Mit diesem Überwachungssystem wurde im Mai 1998 ein plötzlicher Anstieg des Kugelverschleißes und ein Abfall des Wärmedurchgangs festgestellt. Bei einer Begehung einer Wasserkammer wurden durch eine endoskopische Untersuchung beginnende Kalkablagerungen in vorher sauberen Rohren gefunden. Trotz sofortigen Einsatzes von abrasiven Korundkugeln kam es jedoch zur Ausbildung geschlossener, extrem harter Calciumcarbonatschichten in vielen Rohren.

Nach einer gezielten Hochdruckreinigung bei der Revision im April 1999, die sich auf die endoskopisch lokalisierten Belagsreste konzentrierte, waren alle Rohre wieder frei von Ablagerungen.

Besonders deutlich konnte eine erneute Schichtbildung im Mai 1999 und im Mai 2000 mit der Wärmedurchgangsmessung an den überwachten Rohren beobachtet werden. Bemerkenswert ist, daß es offenbar nur in eng begrenzten Zeiträumen im Mai zum Wachsen der Ablagerungen in den Kondensatorrohren kam. Darauf deuten auch entsprechende Leistungsverluste in diesen Zeiträumen hin.

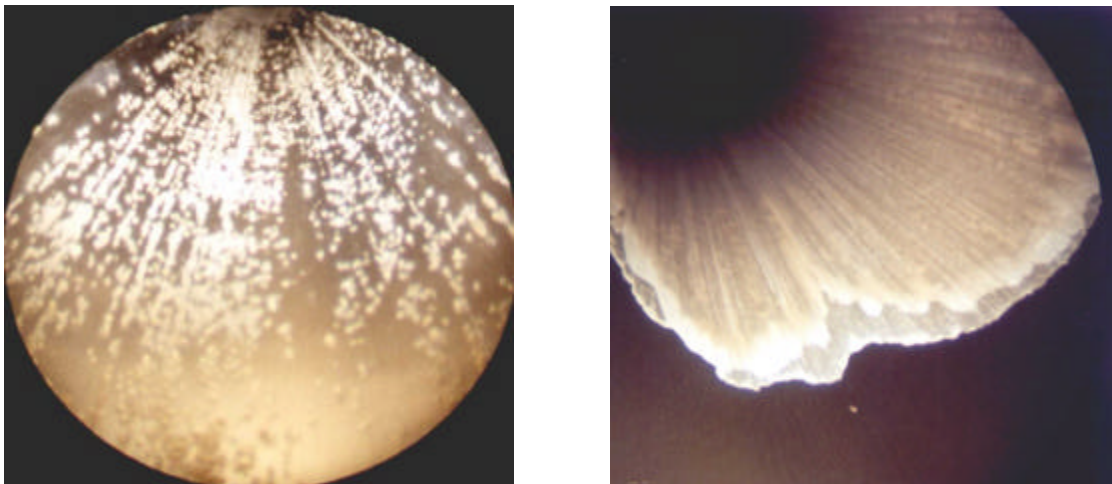
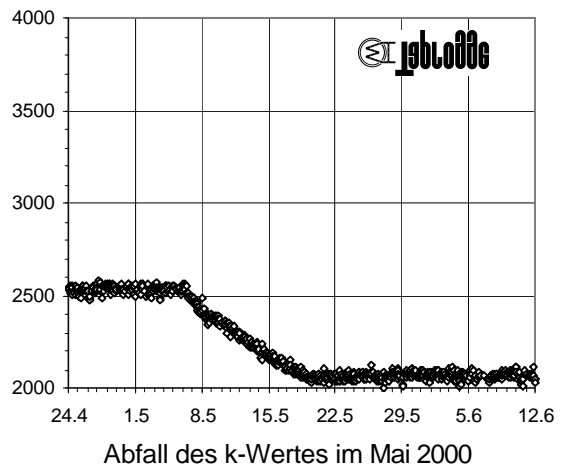
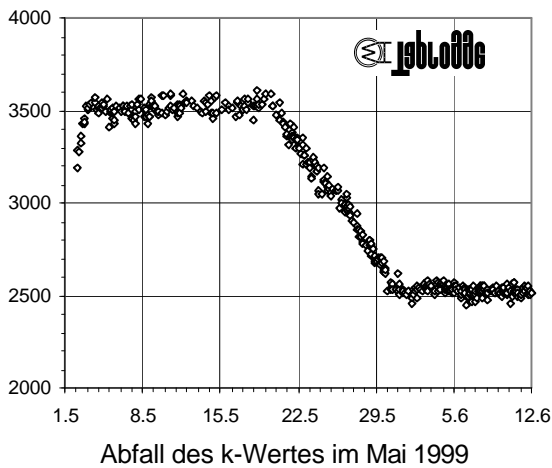


Bild 2: Kalkablagerungen in den Kondensatorrohren. Links Anfangsstadium in einem vorher sauberen Rohr im Mai 1998, 60cm von der Austrittsseite. Es ist die punktförmige Keimbildung zu erkennen. Rechts Belagsrest bei der Revision im April 2000. Es sind die Schleifspuren der eingesetzten Korundkugeln zu erkennen, die die extrem harten, festhaftenden Beläge jedoch nicht abtragen konnten. Der kompakte, im wesentlichen einschichtige kristalline Aufbau aus der Ablagerungsbildung im Mai 1999 ist an der Bruchkante zu erkennen.



Zeitraum	k-Wert in W/m²K	Bemerkung
Wiederanfahrt nach Revision 1999 18. – 31. Mai 1999	3510 Abfall auf 2520	Rohr abgelagerungsfrei Ablagerungsdicke bis 0,5 mm
Wiederanfahrt nach Revision 2000 6. – 18. Mai 2000	2520 Abfall auf 2050	Keine Reinigung dieses Rohres Ablagerungsdicke bis 0,7 mm

Tabelle 2: Messdaten der TAPROGGE Kondensatorüberwachung CMS. Es ist der zeitlich eng begrenzte Abfall des k-Wertes durch das Wachstum der Kalkablagerungen in beiden Jahren 1999 und 2000 zu erkennen

Die Kalkablagerungen führten in der Betriebsperiode 1999/2000 zu Leistungsverlusten von bis zu 15 MW. Zusätzlich entstanden Kosten für die manuelle Reinigung des Turbinenkondensators und der Kühltürme. Zur Vermeidung dieser Verluste müssen die Ursachen für die Ablagerungen in den Kondensatorrohren untersucht und geeignete Gegenmaßnahmen entwickelt werden.

3 Auslösende Faktoren für die Kalkablagerungen

Im allgemeinen bestimmen die Parameter pH-Wert, Temperatur und Salinität des Kühlwassers die Neigung zu Carbonatausfällungen. Bekannte Verfahren zur Beurteilung der Neigung zu Härteausfällungen sind die Berechnung des Ryznar- oder Langelier-Index oder die Bestimmung des Differenz-pH-Wertes nach dem deutschen Einheitsverfahren C 10. Das letztgenannte Verfahren wird im Kernkraftwerk Grohnde im Rahmen der chemischen Betriebsüberwachung in regelmäßigen Abständen angewendet.

Entsprechend den so bestimmten Differenz-pH-Werten hatte das Kühlwasser im ganzen Sommer der Jahre 1999 und 2000 eine kalkabscheidende Tendenz. Tatsächlich haben sich die Ablagerungen in den Kondensatorrohren jedoch nur im Mai gebildet. Damit liefert dieses Verfahren allein keine zuverlässige Vorhersage für das Wachstum von Kalkablagerungen in den Kondensatorrohren. Es müssen also noch andere Faktoren bei der Entstehung der Ablagerungen eine Rolle spielen. Andererseits kann postuliert werden, daß trotz kritischer Kühlwasserbedingungen zu anderen Zeiten das Weiterwachsen der entstandenen Ablagerungen durch die kontinuierliche TAPROGGE-Reinigung verhindert wurde, wenn auch die im Mai entstandene Schicht wegen ihrer großen Härte und Haftung mit abrasiven Reinigungskugeln nicht abgetragen werden konnte.

Die Analyse weiterer Betriebsmeßdaten zeigt, daß zu den Zeiten der Kalkabscheidung in den Kondensatorrohren folgende Bedingungen zusammentreffen:

- hoher pH-Wert
- mittlere Kühlwassertemperatur
- Jahreshöchstwerte des Sauerstoffgehalts
- erste Rückführung von Kühlwasser (Mischkühlung) nach der Revision

In beiden Jahren begannen die Kalkablagerungen zeitgleich mit dem ersten Mischkühlbetrieb nach der Revision. Der Kalkaufbau endete in beiden Fällen zeitgleich mit einem Abfall des pH-Wertes und des Sauerstoffgehalts. Hinsichtlich pH-Wert und Temperatur traten in beiden Jahren im Juli und August noch kritischer erscheinende Bedingungen (höhere Temperatur, pH-Wert und Mischanteil) auf, die aber nicht mehr mit extrem hohen Sauerstoffgehalten der Weser zusammenfielen.

Diese Umstände legen die Vermutung nahe, daß ein Zusammenhang mit der Algenblüte in der Weser besteht, die im Mai bei ausreichender Sonneneinstrahlung abläuft und zu einem besonders hohen Sauerstoffgehalt führt. Die erste Rückführung von Kühlwasser scheint dann die Keimbildung auf der Rohroberfläche auszulösen. Anschließend kommt es zu einem sehr schnellen Wachstum der Kalkschicht, bis der pH-Wert wieder abfällt.

Die Vermutung, daß biologische Vorgänge bei der Kalkablagerung eine Rolle spielen, wird auch durch verschiedene andere Beobachtungen gestützt. Seit einigen Jahren werden zunehmend schmierige Beläge an den Wänden sowie Wachstum von Flechten und Schnecken im Kühlsystem beobachtet. Bei der ersten Inbetriebnahme des nachfolgend beschriebenen Testers im Mai 2000 trat gleichzeitig mit der Kalkablagerung im Kondensator starkes Wachstum von schleimigem Biofouling in strömungsberuhigten Zonen der Kühlwasserleitungen des Testkreislaufs auf, was sich im weiteren Verlauf des Sommers nicht mehr wiederholte.

Die folgenden Diagramme geben eine Übersicht über den Verlauf der verschiedenen Kühlwasserparameter und den Zusammenhang mit der Kalkablagerung in den Kondensatorrohren im Jahr 2000.

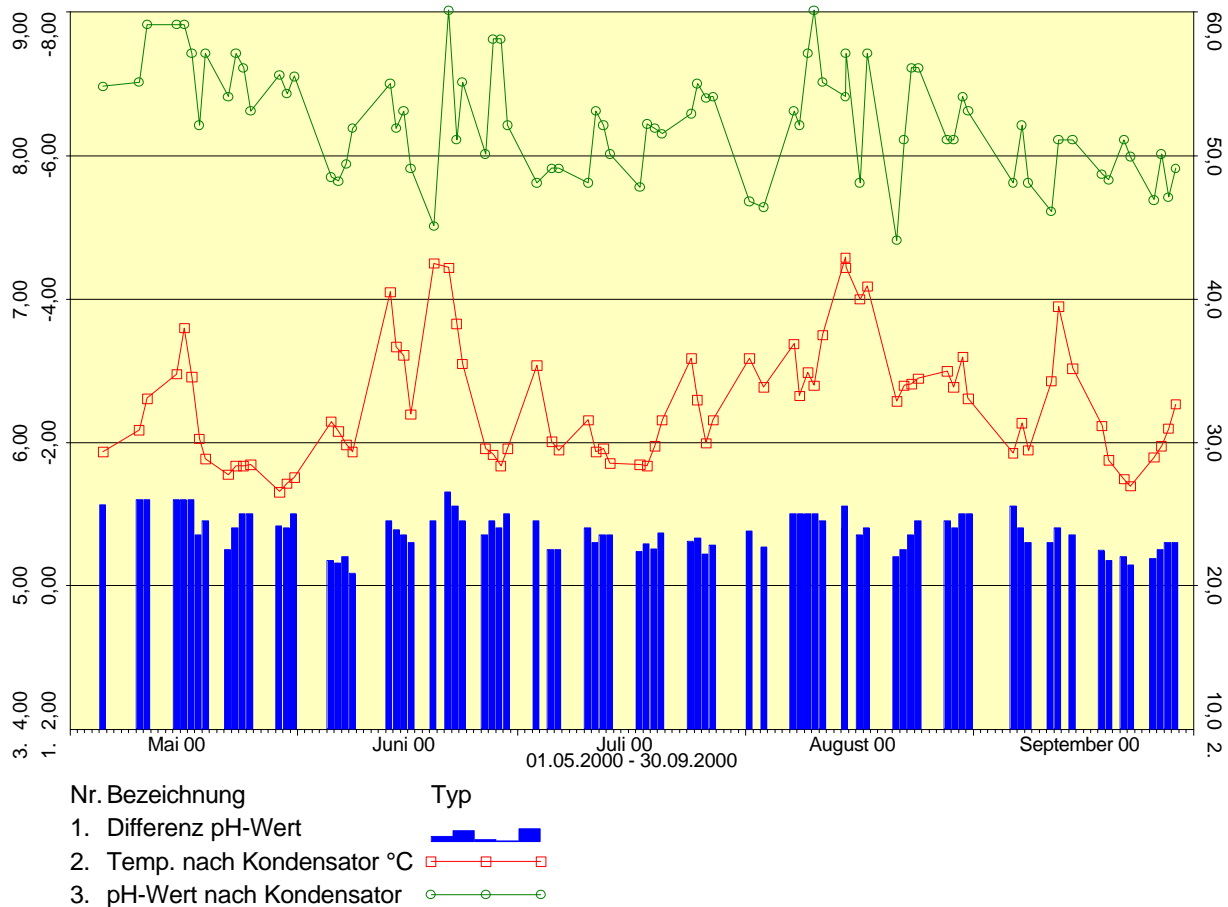


Bild 3 Kühlwasserdaten nach dem Kondensator aus dem Zeitraum Mai-September 2000. Kalkabscheidung in den Kondensatorrohren trat nur vom 6.-18. Mai auf, obwohl im Juni und August höhere Temperaturen und pH-Werte erreicht wurden und auch der Differenz-pH-Wert unter -1 lag.

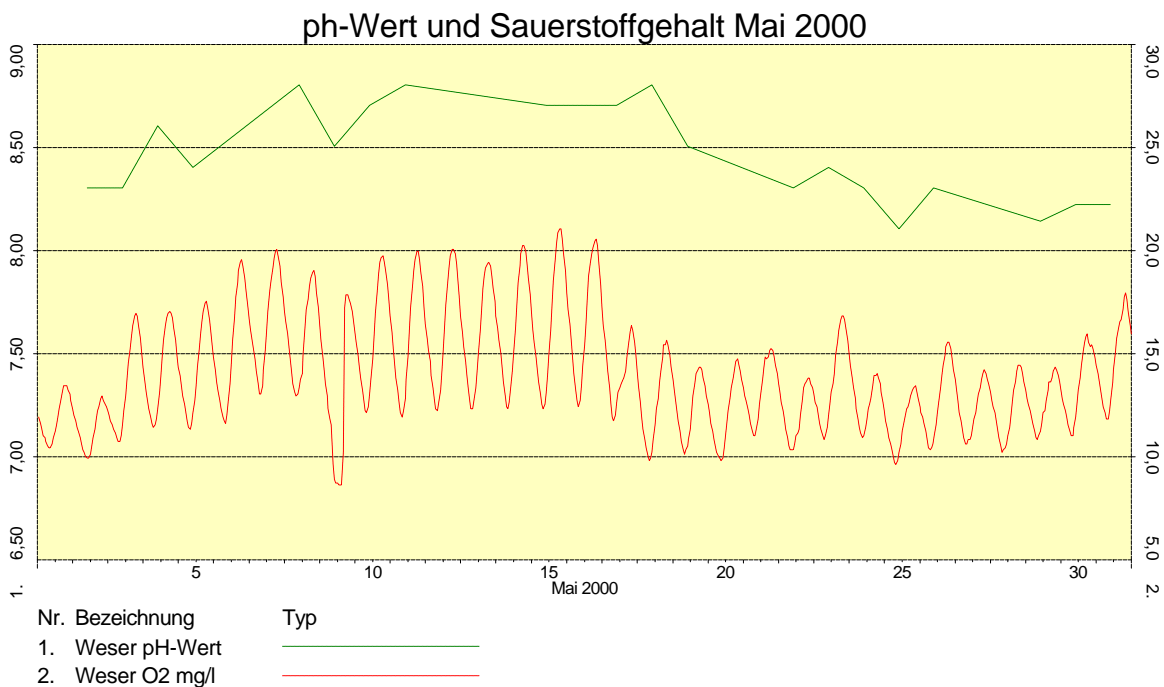
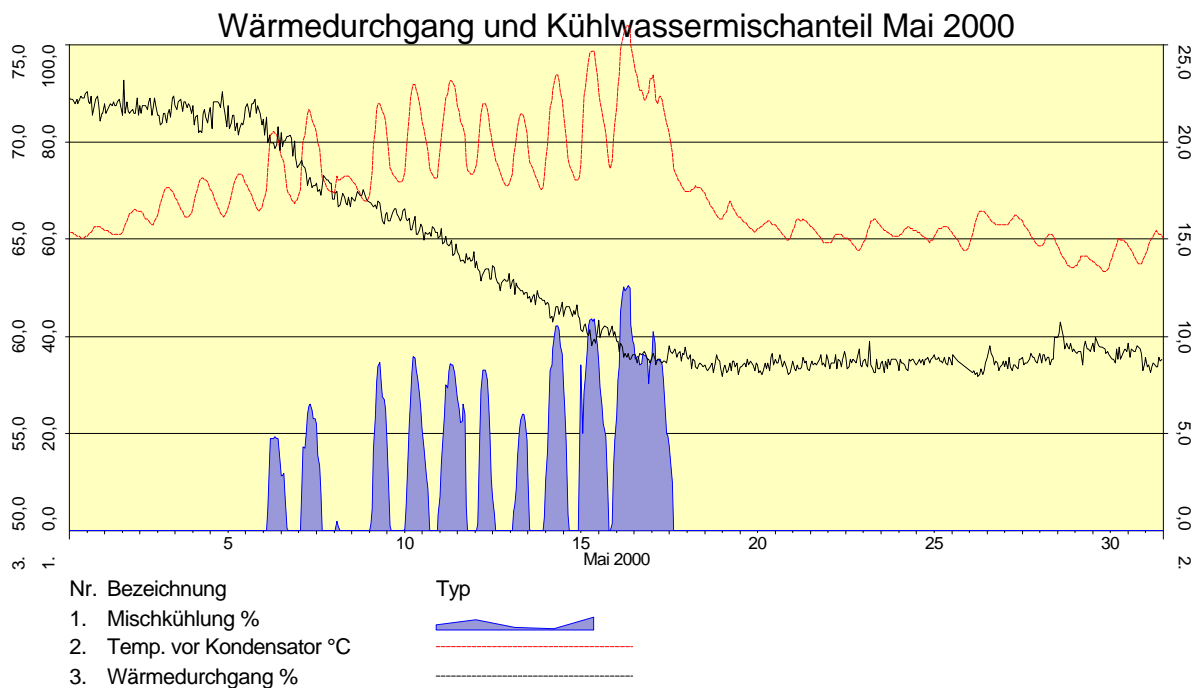


Bild 4 Betriebsmessdaten von Mai 2000. Das Wachstum der Kalkablagerungen trat vom 6.-18. Mai auf (Abfall des gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten als Kurve 3 im oberen Diagramm). Es fällt zusammen mit dem Beginn der Mischkühlung (Kurve 1) und Höchstwerten des Sauerstoffgehaltes (Kurve 2 im unteren Diagramm).

4 Test von Gegenmaßnahmen

Um das Entstehen der Kalkablagerungen in den Rohren genauer beobachten und Gegenmaßnahmen erproben zu können, wurde durch TAPROGGE eine Testeinrichtung am Turbinenkondensator im Kernkraftwerk Grohnde installiert. Mit ihr können die kühlwasserseitigen Verhältnisse in den Kondensatorrohren (Temperatur, Strömung, TAPROGGE-Reinigung) in 6 beheizten Testrohren von jeweils 2 m Länge nachgebildet werden.

Das Kühlwasser für diese Testeinrichtung wird unmittelbar hinter dem Kondensator abgezweigt, so daß die Temperatur bereits erhöht ist und die Bedingungen für die Kalkabscheidung dadurch im Test noch verschärft werden.

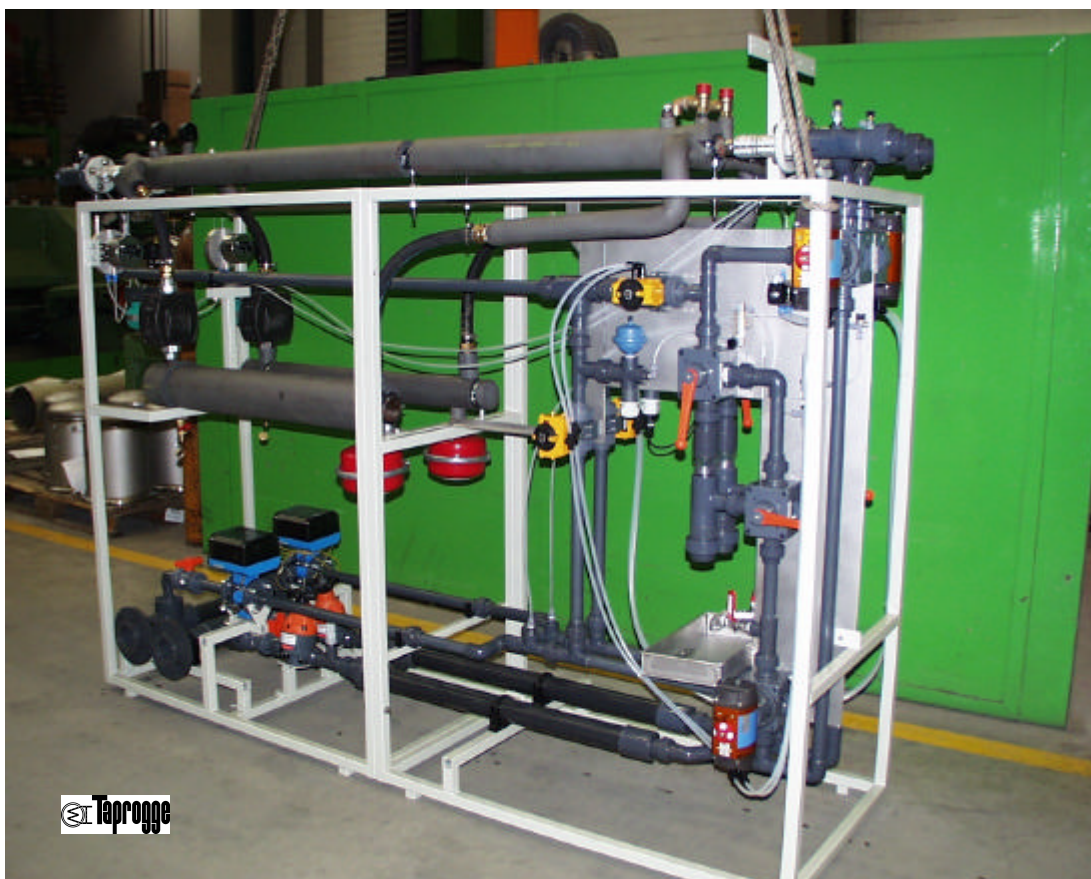


Bild 5 Tester-Modul mit 2 beheizten Testrohren. Die Temperatur- und Strömungsverhältnisse im Kondensator und die automatische TAPROGGE-Reinigung können in den Testrohren genau nachgebildet werden. In einer Mischstrecke können unterschiedliche Konditionierungen des Kühlwassers vor jedem Testrohr erfolgen. Die Testrohre können mit einem Endoskop inspiziert und für Laboruntersuchungen leicht ausgetauscht werden. Für die Untersuchungen im Kernkraftwerk Grohnde sind 3 dieser Module eingesetzt.

An den 6 Testrohren wurden bisher folgende Maßnahmen erprobt:

Testrohr	Wasserbehandlung	TAPROGGE-Reinigung
1	physikalische Behandlung des Kühlwassers durch kapazitive und induktive Spulen in der Zuleitung vor dem Testrohr	ja
2	Dosierung eines Härtestabilisators nach Vorgaben des Herstellers	ja
3	Dosierung von CO ₂ (4-8 ppm)	ja
4	Dosierung von Schwefelsäure (5-10 ppm)	ja
5	ohne	ja
6	ohne	nein

Tabelle 3: Erprobte Gegenmaßnahmen

Der Test begann am 15. Juni 2000. Wie im Kondensator kam es auch in den Testrohren trotz kritischer Kühlwasserbedingungen (Kühlwassertemperatur 47°C bei pH 8,8) nicht zu Kalkabscheidungen. Die TAPROGGE-Reinigung erfolgte nur mit relativ kleinen, nicht abrasiven Reinigungskugeln und sollte nur das Ablagern von Schwebstoffen in den Testrohren verhindern, ohne die Kalkbildung zu beeinflussen. Im Rohr 6 ohne Reinigung bildeten sich insbesondere bis Mitte Juli weiche, schleimige Beläge, die wiederholt manuell entfernt wurden. Ab 18. Juli wurde zur künstlichen Provozierung von Kalkablagerungen der pH-Wert des Kühlwassers durch die Dosierung von Natronlauge in den Zulauf zum Tester auf 9,1 angehoben und zusätzlich ab 25. Juli der Kühlwasserdurchfluß vermindert und damit die Wandtemperatur in den Testrohren erhöht. Erst unter diesen verschärften Bedingungen kam es zu Kalkabscheidungen in den Testrohren.

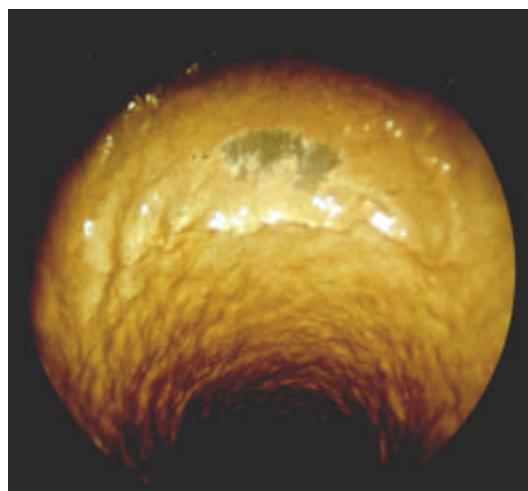
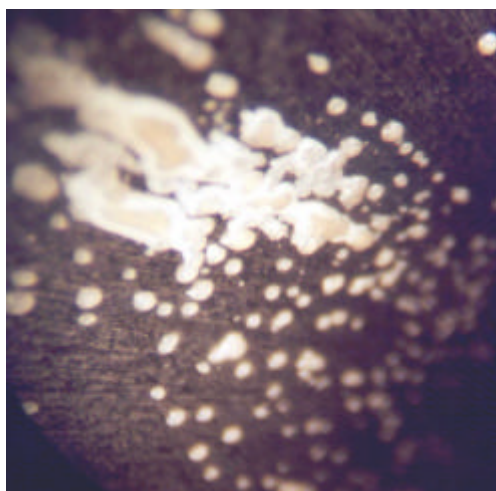


Bild 6 Links Calciumcarbonatabscheidungen im Anfangsstadium am 1.8.2000 (nach Erhöhung des pH-Werts auf 9,1 und Durchflußverminderung). Das Erscheinungsbild entspricht dem im Turbinenkondensator.

Rechts Zustand von Rohr 6 am 5.7.2000 nach 20 Tagen Betrieb ohne Reinigung. Es haben sich etwa 1mm dicke, schleimige Beläge gebildet. Sie bestehen offenbar aus Biomasse und abgelagerten Schwebstoffen und lassen sich abwischen. Diese Beläge wurden wiederholt entfernt, um die Kalkabscheidung auf der Rohroberfläche beobachten zu können.

Der Erfolg der Gegenmaßnahmen wurde während des Tests durch endoskopische Kontrollen und abschließend durch Laboruntersuchungen von Rohrproben beim Allianz Zentrum für Technik beurteilt. Nach Abschluß dieses Testabschnitts haben sich in den einzelnen Testrohren unterschiedliche Beläge ausgebildet:

Testrohr	Behandlung	Dicke [mm]	Belag Menge [g/m ²]	Eigenschaften
1	Physikalisch	1,4	2663	kristallin, hart
2	Härttestabilisierung	0,55	959	inhomogenes Kristallgefüge, dadurch weniger hart
3	CO ₂	0,58-0,75	1242	kristallin, hart
4	Schwefelsäure	0,23	520	kristallin, weniger hart
5	Nur Reinigung	1,07-1,2	2216	kristallin, hart
6	Ohne Reinigung ¹	1,28-1,6	2011	durch Einlagerungen gestörter ungleichmäßiger, kristalliner Aufbau

1) Weiche, schleimige Beläge wurden während dieses Versuchs wiederholt manuell entfernt.

Tabelle 4: Beläge in den Testrohren

Die Element- und Röntgen-Feinstrukturanalysen ergaben, daß es sich bei den Belägen fast ausschließlich um Calciumcarbonat in Form von Calcit handelt. Eine Ablagerungsprobe aus dem Kondensator von der Revision 2000 zeigte die gleiche Zusammensetzung.

Im Rohr 2 (mit Härttestabilisator) fällt ein erhöhter Siliciumgehalt (1,2 % als SiO₂) und Spuren von CaCO₃ als Aragonit im unregelmäßig aufgebauten Kristallgefüge auf.

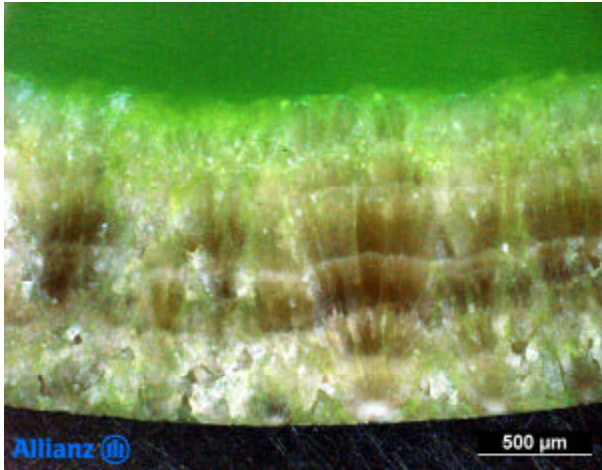
Aragonit findet sich in Spuren auch in Rohr 3 (mit CO₂-Dosierung).

Im Rohr 6 ist der Siliciumgehalt ebenfalls erhöht (0,9 % als SiO₂), offenbar durch die Einlagerungen von Schwebstoffen aufgrund der fehlenden Rohrreinigung.

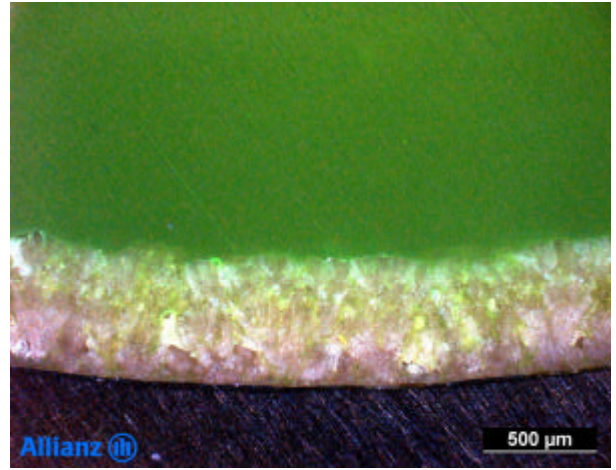
Auffällig ist ein relativ hoher Zinngehalt von 0,4-0,5 % als SnO₂ in allen Proben.

Die Ergebnisse zeigen, daß mit Härttestabilisatoren und mit der Dosierung von Schwefelsäure zur pH-Wert-Absenkung in Verbindung mit der TAPROGGE-Reinigung die Belagbildung am stärksten vermindert werden kann. Mit *Härttestabilisatoren* entstehen zwar Ablagerungen, die jedoch durch die Behinderung des Kristallwachstums eine amorphe Struktur bekommen. Sie weisen dadurch keine große Härte auf und können mit abrasiven Reinigungskugeln entfernt werden. Die Absenkung des pH-Wertes um 0,3 durch *Schwefelsäure* hat die Ablagerungsmenge deutlich vermindert. Es entstand nur eine dünne Schicht, die mit abrasiven Reinigungskugeln entfernt werden kann.

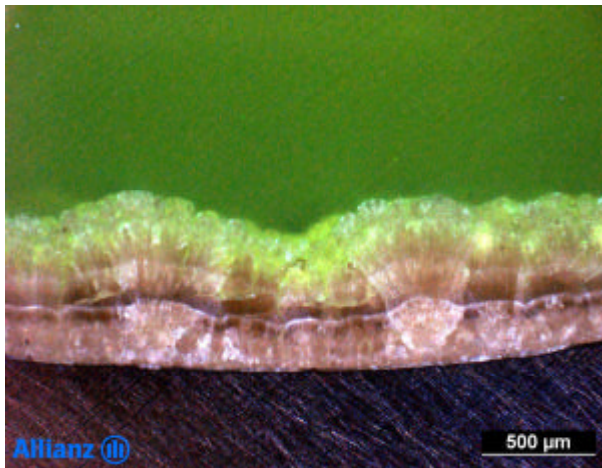
Die *physikalische Wasserbehandlung* zeigte in diesem Test keine Wirkung.



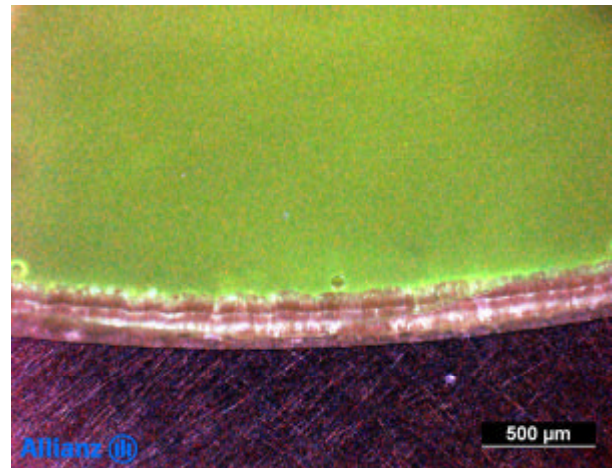
Testrohr 1: Physikalische Wasserbehandlung
Sehr harte kristalline Struktur, 1,4 mm



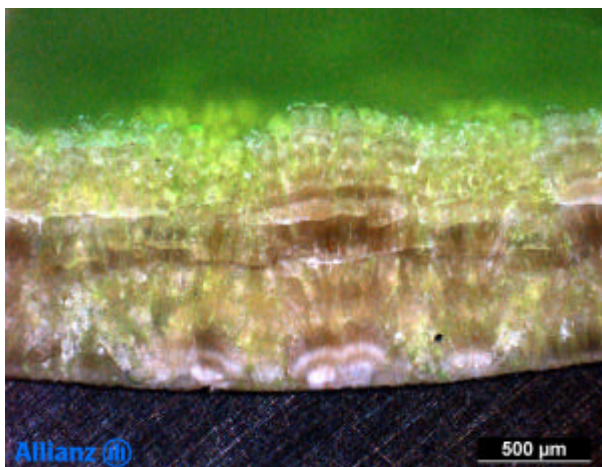
Testrohr 2: Härtestabilisierung
Weniger hartes, inhomogenes Kristallgefüge, 0,55 mm



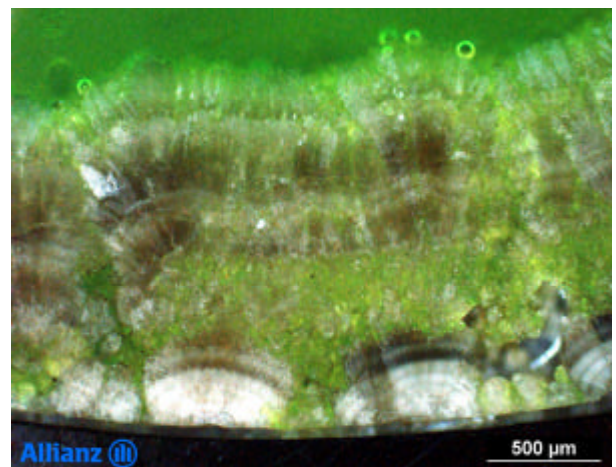
Testrohr 3: CO₂-Dosierung
Sehr harte, kristalline Struktur, 0,58-0,75 mm



Testrohr 4: Schwefelsäuredosierung
Weniger harte, kristalline Struktur, 0,23 mm



Testrohr 5: Nur Reinigung
Sehr harte, kristalline Struktur, 1,07-1,2 mm



Testrohr 6: ohne Reinigung
Aufgelockerte, inhomogene Struktur mit vielen
Einlagerungen, 1,28-1,6 mm

Bild 7: Schlibfbilder der Beläge in den Testrohren

Die Zudosierung von *Kohlendioxid* CO₂ war in diesem Versuch weniger wirksam als die Schwefelsäuredosierung. Hier kann jedoch eine unvollständige Lösung des zudosierten Kohlendioxid das Ergebnis leicht verfälscht haben.

Ohne TAPROGGE-Reinigung entstehen zu Zeiten hoher biologischer Aktivität des Wassers innerhalb weniger Tage weiche, schleimige Beläge in den Rohren. Unter kalkabscheidenden Bedingungen bilden sich in den Rohren ungleichmäßige Calciumcarbonatablagerungen mit einem durch Schwebstoffeinlagerungen stark gestörten Kristallaufbau. Diese Ablagerungen sind nicht so kompakt wie die in den anderen Rohren mit TAPROGGE-Reinigung und verursachen dadurch erhebliche Wärmedurchgangsverluste. Sie haben eine aufgelockerte Struktur und eine geringere Härte.

5 Konsequenzen

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen führten zu erfolgversprechenden Ansatzpunkten zur Vermeidung der Kalkablagerungen in den Kondensatorrohren.

Die Auswertungen der Betriebsmeßdaten und der TAPROGGE-Kondensatorüberwachung zeigten, daß es nur in bestimmten, kurzen Zeiträumen zum Wachsen dieser Ablagerungen in den Kondensatorrohren kommt und dabei offenbar biologische Aktivitäten eine auslösende Rolle spielen. Aus den bisherigen Erkenntnissen kommen die Dosierung von Schwefelsäure zur pH-Wert-Absenkung oder eines Härtestabilisators zur Störung der Kristallbildung als erfolgversprechende Gegenmaßnahmen in Betracht. Diese Verfahren müssen noch auf ihre großtechnische Anwendbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Genehmigungsfähigkeit für das Kernkraftwerk Grohnde hin untersucht werden.

Diese zusätzlichen Gegenmaßnahmen müssen nur während der kurzen Zeiten der ungünstigen Betriebsbedingungen mit extremer Ablagerungsbildung in den Kondensatorrohren angewendet werden, da in den übrigen Zeiten die Kondensatorrohre mit Reinigungskugeln saubergehalten werden können. Das Auftreten von Kalkablagerungen kann mit der genauen Beobachtung des Verschleißverhaltens der Reinigungskugeln und des Wärmedurchgangs an Einzelrohren durch das TAPROGGE-Überwachungssystem im frühen Anfangsstadium festgestellt werden.

Aufgabe der Betriebsüberwachung ist es, diese ungünstigen Betriebsbedingungen eindeutig vorhersagen und damit die Gegenmaßnahmen in ökonomisch und ökologisch optimierter Weise einsetzen zu können.

Die Fortführung der Tests mit der Versuchseinrichtung bei den jahreszeitlich und wetterbedingt kritischen Kühlwasserbedingungen ist angebracht, um die auslösenden Faktoren noch genauer zu klären und eine Vorhersage der kritischen Bedingungen zu ermöglichen. Dabei könnte sowohl die Konditionierung des Kühlwassers als auch der darauf abgestimmte Betrieb der TAPROGGE-Reinigungsanlage auch in wirtschaftlicher Hinsicht optimiert werden.