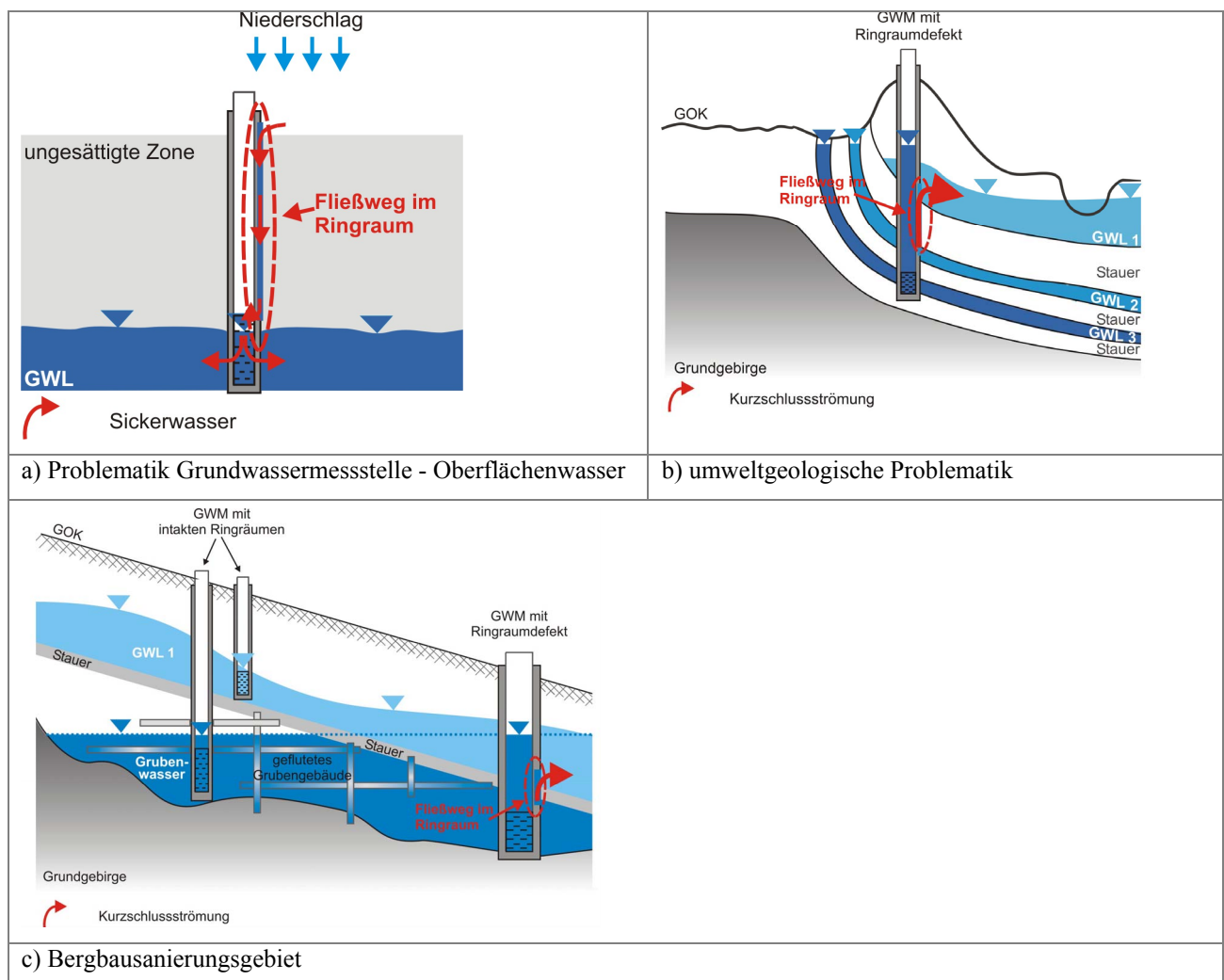


## ZUSAMMENFASSUNG, THESEN UND AUSBLICK

### Zusammenfassung & Thesen

Das Eindringen von Schadstoffen in Grundwasserressourcen durch beispielsweise Oberflächenwasser beziehungsweise hydraulische Kurzschlüsse zwischen Grundwasserleitern sind zu vermeiden. Für beide Aspekte bieten Grundwassermessstellen, die eigentlich zur Beobachtung und laufenden Kontrolle des Grundwassers errichtet wurden, bei Mängeln jedoch selbst verschiedenste mögliche Fließwege an. Nach Regelwerken soll nicht nur vom technischen Ausbau keine Beeinträchtigung auf die Grundwasserbeschaffenheit ausgehen, sondern er soll auch vor allem unerwünschte Zuflüsse unterbinden.

Grundwassermessstellen dienen nicht nur zur Überwachung der Wassergüte und zur Erhebung von hydrogeologischen und hydrologischen Daten, sondern auch zur Beobachtung der Grundwasserkörpertemperatur. Eine Änderung der Grundwassertemperatur führt zu einer Änderung der physikalischen Eigenschaften sowie der chemischen und biologischen Beschaffenheit. Hiermit sind die anschließenden Konsequenzen Änderungen in den Selbstreinigungsprozessen im Boden und im Grundwasser und damit in Verbindung stehenden Einflüssen in das empfindliche Ökosystem ober- und unterhalb des Grundwasserleiters.



**Abbildung 1 Motivation zur Entwicklung des Messsystems Azimuthal-Annulus-Convection-Identification (AACD)-Logs**

Geophysikalische Bohrlochmesssonde zur multimethodischen und azimutabhängigen Detektion von Strömungen im Ringraum von Grundwassermessstellen

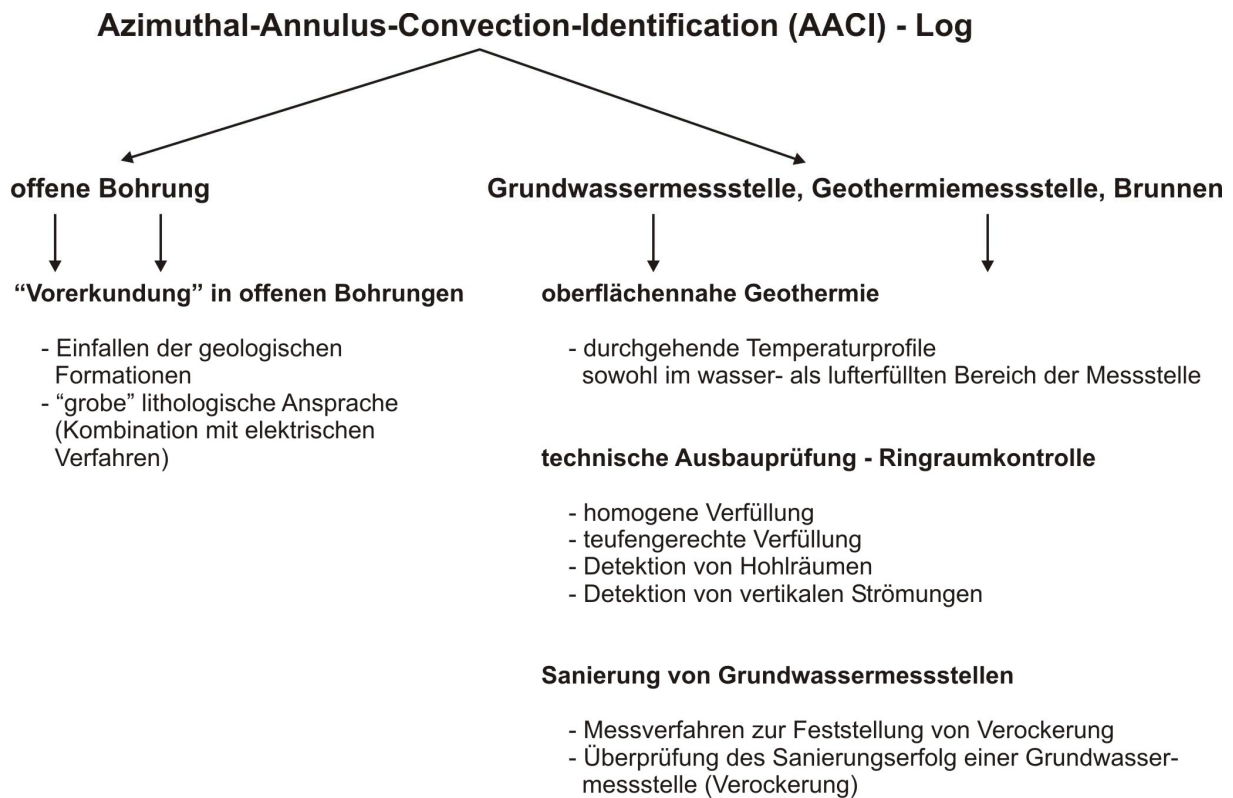
Für eine repräsentative Messwertaussage ist ein intakter technischer Ausbau von Grundwassermessstellen Grundvoraussetzung. Der Überprüfung der hydraulischen Wirksamkeit von Tonsperren stellt daher ein wichtiges Element dieser technischen Ausbaukontrollmessung dar.

Gegenstand der Arbeit war die Entwicklung eines bohrlochgeophysikalischen Messverfahrens zur hochauflösenden gerichteten Detektion von Ringraumdefekten und daraus resultierenden vertikalen Strömungen hinter der Verrohrung. Zusätzlich sollte die entwickelte Bohrlochsonde durchgehende Temperaturprofile einer Grundwassermessstelle erheben. Ein Verfahren in der oberflächennahen Geophysik zur Erstellung eines durchgehenden Temperaturprofils – sowohl im wasser- als auch im luftgefüllten Bereich – konnte im Laufe der Arbeit nicht eruiert werden.



**Abbildung 2** Azimuthal-Annulus-Convection-Identification (AACI)-Log

Im Ergebnis liegt ein bis zur Anwendungsreife gebrachtes Messsystem, namens Azimuthal-Annulus-Convection-Identification (AACI)-Log (Abbildung 2) vor, welches seine Anwendung sowohl in offenen als auch in ausgebauten Grundwassermessstellen findet. In offenen Bohrungen dient das AACI-Log der „Vorerkundung“. Es können Aussagen zum Einfallen geologischer Formationen getroffen werden und lithologische Ansprachen in Kombination mit elektrischen Verfahren erfolgen. In ausgebauten Grundwassermessstellen dient es zur technischen Ausbaukontrollmessung, zur Erhebung durchgehender Temperaturprofile und außerdem zur Klärung von Fragen bezüglich der Messstellensanierungen. Bei der technischen Ringraumkontrolle können Aussagen zur homogenen beziehungsweise teufengerechten Verfüllung und zur hochauflösenden Detektion von Hohlräumen und daraus resultierenden vertikalen Strömungen getroffen werden. Im Bereich der Grundwassermessstellensanierung kann mit dem Messverfahren eine Verockerung festgestellt und der Sanierungserfolg überprüft werden. Hiermit zeigt sich der weite Einsatzbereich dieses Messverfahrens die Vorerkundung, die Beurteilung der Repräsentativität von Messstellen, der Grundwasserschutz, die oberflächennahe Geothermie oder Fragestellungen bei Sanierungsgebieten im Bergbau und Deponien (Abbildung 3).



**Abbildung 3** Schema über die Einsatzbereiche des Azimuthal-Annulus-Convection-Identification (AACI)-Logs

Messmethodisch werden die gerichtete Lokalisierung von Hohlräumen und die damit in Verbindung stehenden vertikalen Strömungen im Ringraum durch die Kombination einer azimuthalen Gamma- oder Gamma-Gamma-Dichte-Messung mit einer azimuthalen Temperaturmessung realisiert. Anhand dieser Verfahrenskombination werden gleichzeitig die Ursache (Hohlraum, potentieller Fließweg) und die Auswirkung (vertikale Strömung) detektiert. Die technische Realisierung erfolgt durch eine geophysikalische Bohrlochsonde, die vier um 90° versetzte identische Sondenarme elastisch an die Verrohrung drückt. Auf jeden Sondenarm befinden sich die Sensoren der genannten Messverfahren. Hiermit wird in einer Teufe eine horizontale Messebene aufgespannt und in 90° Segmenten vermessen. Jeder aufgenommene Messwert wird seiner räumlichen Lage zugeordnet. Durch diese Segmentierung der horizontalen Messebene wird ein azimuthal-differenziertes gerichtetes Bild des Ringraums erstellt. Anhand der technischen Realisierung der Temperatur-Sensoren können durchgehende Temperaturprofile einer Grundwassermessstelle erfasst werden. Das Messverfahren selbst wird am Deutschen Patent- und Markenamt (DPMA) als Patent unter dem Aktenzeichen DE 10 2008 001 439.7 geführt.

Für die Untersuchung des Wärmetransports sowie der Wechselwirkung der Gammastrahlung mit der umliegenden Materie (Photonentransport) und die Optimierung des Messsystems wurden numerische Berechnungen mit dem finite Elemente Programm COMSOL Multiphysics und dem Monte Carlo Code MCNP durchgeführt.

Die numerischen Berechnungen des Wärmetransports zeigen, dass eine vertikale Strömung hinter der Verrohrung ein azimuthal-differenziertes Temperaturbild im Ringraum verursacht. Dieses azimuthal-differenzierte Temperaturbild überträgt sich von der Ringraumfüllung auf die Verrohrung und ist an der Rohrwand mit einem Temperatursensor messbar.

Mit Hilfe der numerischen Berechnungen zur Wechselwirkung der Gamma-Strahlung mit der umliegenden Materie (Photonentransport) wurden einerseits technische Ausführungsdetails für das zukünftige Azimuthal-Annulus-Convection-Identification (AACI)-Log und andererseits synthetische Bohrlochmesskurven berechnet. So konnte für das AACI-Log ein optimales Spacing von 300 mm ermittelt werden. Mit diesem Spacing wird ein, mit Verdichtungston ( $\rho = 1,73 \text{ gcm}^{-3}$ ) abgedichteter, 100 mm Ringraum mit bestmöglicher vertikaler Auflösung in seiner Mächtigkeit vollständig erfasst. Die numerisch berechneten Bohrlochmesskurven zeigen den Einfluss unterschiedlich im Ringraum positionierte Hohlräume auf das Messresultat oder die unterschiedliche vertikale Auflösung verschiedener Spacings. Weiterhin belegen numerische Berechnungen den Einsatzbereich AACI-Logs in der Erfolgskontrolle einer Grundwassermessstellensanierung. Für diese Erfolgskontrolle ist lediglich eine Basismessung vor der Sanierung mit einer Kontrollmessung nach erfolgter Sanierung zu vergleichen.

Anhand der Auswertung umfangreicher Testmessungen im Technikum wurde der messbare Nachweis des kühlenden oder wärmenden Einflusses einer vertikalen Strömung im Ringraum aufgezeigt. Ebenfalls wurden das daraus resultierende azimuthal-differenzierte Temperaturbild und dessen Detektion an der Innenwand der Verrohrung nachgewiesen. Wird das azimuthale Temperaturmessverfahren über die gesamte Teufe der Messstelle aufgenommen und fließt in die Interpretation der Geothermische Gradient ein, können Aussagen zur Strömungsrichtung entlang der Teufenachse getroffen werden. Die im Technikum gemessenen Bohrlochmesskurven des Gamma-Gamma-Dichte-Verfahrens bestätigen die numerisch berechneten Werte.

Die Erprobung des Messverfahrens unter realen Bedingungen in ausgebauten Grundwassermessstellen weist ein zuverlässiges Messsystem aus. Das AACI-Log wurde erfolgreich in der technischen Ausbauprüfung (Ringraumkontrolle) und bei Fragestellungen zur oberflächennahen Geothermie (durchgehende Temperaturprofile, Temperaturmonitoring über einen Zeitraum von 13 Monaten) eingesetzt.

In der Ringraumkontrolle wurden homogene und teufengerechte Verfüllungen, Nachrutschen/-sacken von Filterkies in Tonsperren, eine Brückenbildung und Hohlräume detektiert. Ebenfalls wurden die Tonsperren auf ihre hydraulische Sperrwirkung untersucht. Weiterhin konnte ein „spiralförmiges Schlingeln“ von Messstellenrohren entlang der Bohrlochwand in Grundwassermessstellen mit fehlender Ringraumfüllung nachgewiesen werden.

Im Bereich der oberflächennahen Geothermie erbrachten die Feldtests, dass mit dem Messverfahren eine neue geophysikalische Bohrlochmesssonde für die Untersuchung der Untergrunderwärmung von Stadtgebieten zur Verfügung steht, mit dem aus bereits bestehenden Grundwassermessstellen oberhalb des Rohrwasserspiegels Informationen zur Untergrundtemperatur ermittelt werden können. Die daraus schließende Konsequenz ist eine Messdatenverdichtung, die wichtige Informationen beziehungsweise Hinweise für die komplexe Interpretation und Untersuchung der Grundwasserkörpererwärmung und daran gekoppelter Prozesse liefert.

Im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren besitzt das neue Messsystem folgende entscheidende Vorteile:

- Das vorgestellte Azimuthal-Annulus-Convection-Identification (AACI)-Log zeigt in seinem Messergebnis nicht nur eine azimuthale Differenzierung (gerichtetes Bild) des Ringraums, sondern es werden anhand der Verfahrenskombination gleichzeitig Ursache (Hohlraum, potentieller Fließweg) und Auswirkung (tatsächliche Strömung) aufgezeigt.
- Das AACI-Log ist sowohl im wassererfüllten als auch im luftgefüllten Bereich von Messstellen einsetzbar.

- Zum Nachweis vertikaler Strömungen im Ringraum muss in die Messstelle kein Tracer eingebracht beziehungsweise die vertikale Strömung im Ringraum hydraulisch angeregt werden.
- Aus zuvor genanntem Aspekt (Tracerinjektion oder hydraulische Anregung herkömmlicher Verfahren) geht hervor, dass das AACI-Log unabhängig von der Lage der vertikalen Strömung im Ringraum ist (es wird keine hydraulische Verbindung zwischen Wassersäule und Fließweg im Ringraum benötigt).
- Die Messung ist im Vergleich zu konventionellen Messverfahren zum Nachweis vertikaler Strömungen im Ringraum kostengünstig und zeitsparend. Der herkömmliche Nachweis basiert auf einer Kombination mehrerer nacheinander zu messender unabhängiger Verfahren. Mit dem ersten Verfahren (beispielsweise Dichte-Ringraumscannerlog) wird der Hohlraum im Ringraum nachgewiesen und mit einem anschließenden zweiten Verfahren (z. B. Tracer-Verfahren oder hydraulische Anregung der Strömung im Ringraum) werden Aussagen zur vertikalen Strömung im Ringraum getroffen.
- Mit dem Messverfahren des AACI-Logs werden durchgehende Temperaturprofile – sowohl im wasser- als auch luftgefüllten Bereich der Messstelle – erhoben.
- Das AACI-Log ist vom Messstellenausbau unabhängig.

### Ausblick

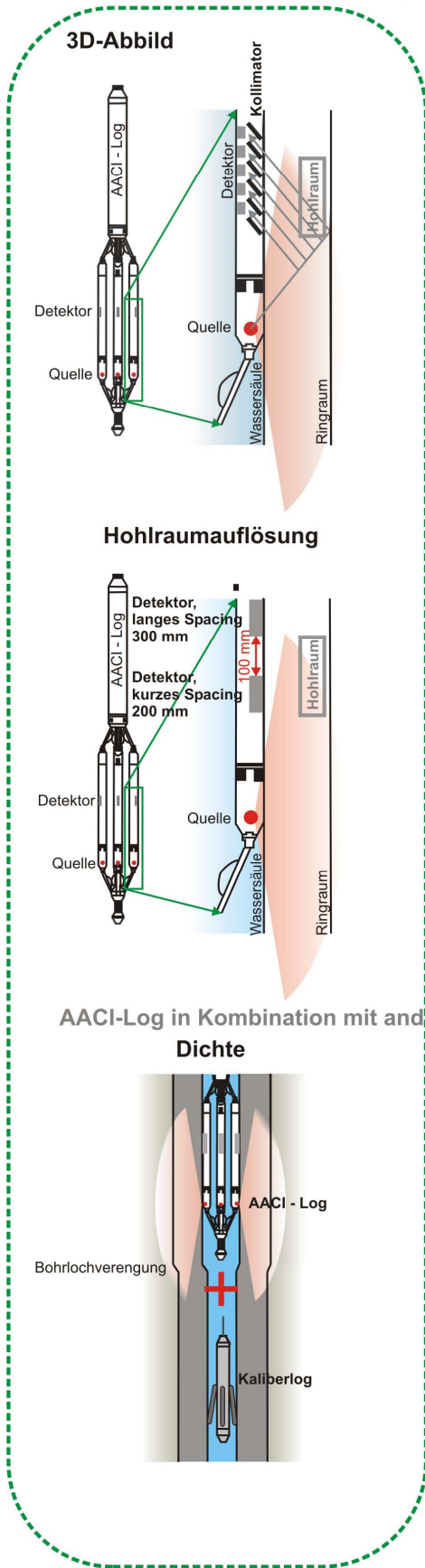
Weiterführende Arbeiten beim Azimuthal-Annulus-Convection-Identification (AACI)-Log liegen in der Modifizierung der Messtechnik und der Untersuchung der daraus resultierenden neuen Einsatzgebiete des Logs. Abbildung 4 zeigt einen schematischen Überblick der technischen Weiterentwicklungen.

Die derzeitige Messwertauswertung vom AACI-Log gestattet es, ein gerichtetes Bild vom Ringraum einer Grundwassermessstelle abzubilden. Eine deutliche Weiterentwicklung der Messaussage wäre ein dreidimensionales Bild. Ein solches dreidimensionales Bild kann durch den Einbau von Kollimatoren vor den NaJ-Detektoren erreicht werden. Diese Plättchen, beispielsweise aus Blei oder Wolfram, lassen aufgrund ihrer Anordnung nur aus bestimmten Tiefenbereiche parallele Strahlenbündel zu den NaJ-Detektoren gelangen. Hiermit würden zur azimuthalen Aussage auch Tiefenwerte hinzukommen, womit in Kombination beider Messwertaussagen die Erstellung eines dreidimensionalen Bildes vom Ringraum ermöglicht wird. Herausforderungen in dieser Modifizierung sind eindeutig die konstruktive Anordnung der Blei-Täfelchen aufgrund des geringen Platzes und die Messwertstatistik. Aufgrund der selektiven Unterteilung der gesamten rückgestreuten Photonen in parallele Strahlenbündel müsste entweder mit höheren radioaktiven Strahlern oder mit längeren Messzeiten gearbeitet werden.

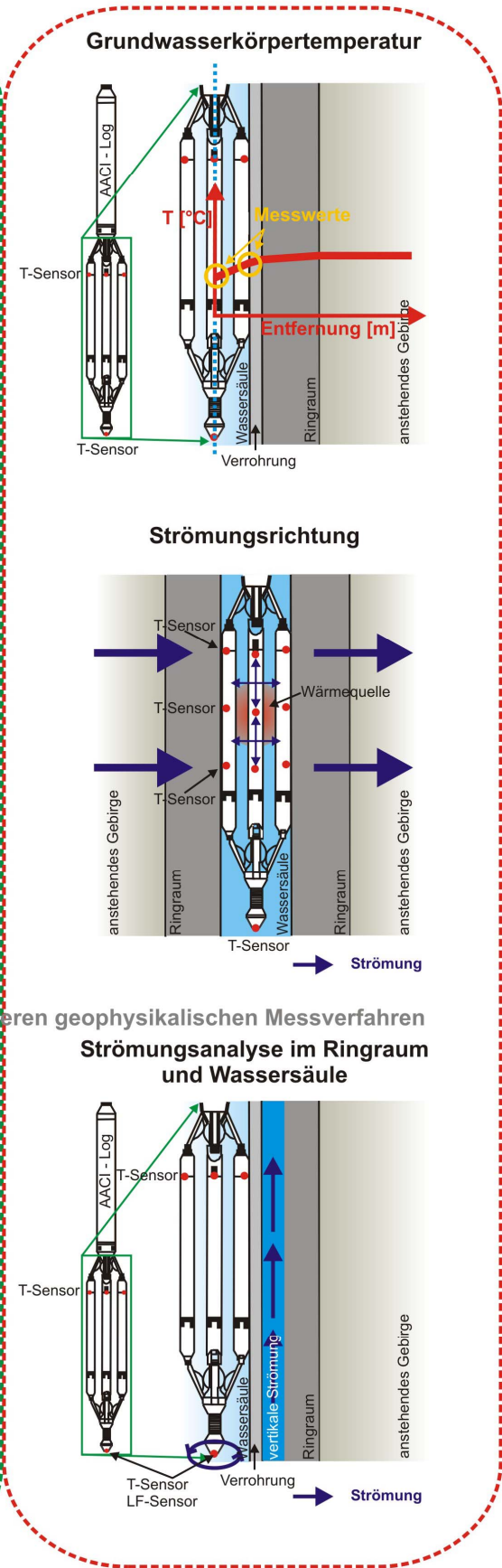
Eine einfachere technische Modifizierung bei der azimuthalen Gamma-Gamma-Dichte Messung bestünde in der Einführung eines zweiten NaJ-Detektors in jedem Messarm. Zu dem bestehenden Spacing von 300 mm, welches eine regelkonforme Ringraummächtigkeit bei Grundwassermessstellen von 100 mm gut abdeckt, könnte eine kürzeres oder längeres Spacing dazugenommen werden. Ein zusätzliches kürzeres Spacing von 200 mm würde eine höhere vertikale Auflösung ermöglichen. Hingegen ein zusätzliches größeres Spacing von beispielsweise 500 mm gestattet es mit seinen größeren Eindringtiefen auch das anstehende Gebirge zu detektieren. Weiterhin können durch das Anwenden zweier Spacings Messeffekte, welche durch das Bohrloch selbst oder die Verrohrung verursacht werden, durch Kombinieren und Vergleichen der beiden Messergebnisse korrigiert werden.



**Azimutale  
Gamma-Gamma-Dichte Messung**



**Azimutale  
Temperatur Messung**



**Abbildung 4** Ausblick über potentielle Modifizierungen und daraus entstehende neue Einsatzbereiche des Azimuthal-Annulus-Convection-Identification (AACI)-Logs

Geophysikalische Bohrlöchermesssonde zur multimethodischen und azimutabhängigen Detektion von Strömungen im Ringraum von Grundwassermessstellen

Eine Modifizierung im Bereich der azimuthalen Temperaturmessung bestünde in der Aufrüstung des AACI-Logs mit einem weiteren Temperatur-Sensor für die Messung der Temperatur von der Wassersäule. Bereits während dieser Arbeit zeigten erste numerische Berechnungen mit dem Programm COMSOL Multiphysics, dass, wie in Abbildung 4 schematisch dargestellt, ein Temperaturgradient zwischen der Verrohrungswand und der Mitte der Wassersäule existiert. Der Grundansatz besteht darin, aus der Ermittlung des Temperaturgradienten zwischen Wassersäule und Verrohrungswand und der Kenntnis der eingebauten Materialien und des anstehenden Gebirges mit Hilfe eines Rechenalgorithmus auf die tatsächliche Grundwasserkörpertemperatur schließen zu können.

In der Erprobungsphase des Messsystems gegenübergestellte Temperaturmessungen mit einer konventionellen Temperatur-Bohrlochmesssonde zeigen, dass dieser Temperaturgradient im oberflächennahen Bereich der Wassersäule stärker ausgeprägt ist, als mit zunehmender Teufe. Ab der neutralen Zone der Wassersäule liegt bei ungestörten Grundwassermessstellen ein Gleichgewicht zwischen der Temperatur des Systems Grundwassermessstelle und der des Grundwasserkörpers vor. Gerade im oberflächennahen Bereich der Wassersäule, würde hier eine exaktere Temperaturmessung des Grundwasserkörpers möglich sein. Natürlich ist diese These noch genau zu untersuchen.

Eine weitere Modifizierung könnte im Einbau mehrerer Temperatursensoren mit einer zentralen Wärmequelle zur Untersuchung von Wasserbewegungen in Grundwassermessstellen sein. Voraussetzung für dieses stationäre Messverfahren wäre natürlich, dass die erzwungenen Ströme größer als die Triebkräfte der freien Konvektion sind. Vorteil des so modifizierten AACI-Log gegenüber beispielsweise einer am Institut für WasserRessourcenManagement der JOANNEUM Research entwickelten thermischen Messsonde (Schön, 1996-2) zur Untersuchung der horizontalen Strömung bestünde in der gleichzeitigen Untersuchung der vertikalen Strömungen in der Wassersäule.

In der geophysikalischen Bohrlochmessung sind zur Optimierung der Messwertinterpretation Kombinationen verschiedener Bohrlochsonden die Regel. Auf Seite der azimuthalen Gamma-Gamma-Dichte-Messung könnte diese mit einem Kaliberlog kombiniert werden. Im Vorfeld würden für das AACI-Log Dichte-Kalibrierwerte für verschiedenste Durchmesser (bei bekannter Dichte) erfasst werden. In der Kombination mit dem Kaliberlog werden hiermit direkte Dichtebestimmungen in offenen Bohrungen beziehungsweise in ausgebauten Grundwassermessstellen möglich. In ausgebauten Grundwassermessstellen könnte rein technisch ein Kaliberlog bereits in die Messarme des AACI-Logs integriert werden; in offenen Bohrungen müsste ein eigenständiges Kaliberlog gefahren werden, da das AACI-Log mit seiner Federarmkonstruktion nicht in der Lage ist beispielsweise Kavernen zu detektieren.

Weiterhin besteht natürlich die Möglichkeit, dass AACI-Log mit einem synthetischen Konvektionslog (Börner & Berthold, 2009, Berthold, 2009) zu kombinieren. Hier bestünden wie beim vorangegangenen Beispiel zwei technische Möglichkeiten. Zum einen kann eine abwärtsgerichtete Messung der Temperatur und der Leitfähigkeit von der Wassersäule vor der azimuthalen Vermessung mit dem AACI-Log erfolgen oder das Azimuthal-Annulus-Convection-Identification (AACI)-Log wird mit einem Temperatur- und Leitfähigkeitsfühler für die Wassersäule aufgerüstet. In dieser Verfahrenskombination ist nicht nur eine Unterscheidung zwischen Strömungsprozessen in der Grundwassermessstelle und dem Ringraum möglich, sondern auch eine gleichzeitige Strömungsanalyse. Das synthetische Konvektionslog unterscheidet in der Wassersäule von einer Grundwassermessstelle zwischen erzwungenen und freien Strömungen und das AACI-Log gibt Auskunft über vertikale Strömungen im Ringraum.

Ein großes Einsatzgebiet für das AACI-Log sind auch Bohrungen für Erdwärmesonden. In der oberflächennahen Geothermie werden für die Heizenergieversorgung von Häusern sehr oft mehrere Grundwasserstockwerke durchteuft. Aus dem Blickwinkel des Grundwasserschutzes gesehen, wird in einem Stadtgebiet die punktuell gehäufte Entnahme von Wärme aus dem Untergrund zum sekundären Problem. Primär besteht die Gefahr, dass auch undichte Abdichtungen von Bohrungen für Erdwärmesonden unzählige potentielle Fließwege für Wasser darstellen. Das primäre Risiko besteht hiermit im kurzschließen mehrerer Grundwasserstockwerke. Ein großes Potential wird in einer technischen Modifizierung gesehen, die es gestattet, mit dem AACI-Log auch in kleinkalibrigen Verrohrungen  $\varnothing \leq 50$  mm einzufahren, um Grundwasserleiterkurzschlüsse aufgrund von Erdwärmebohrungen nachweisen zu können.