

Hydraulische Charakterisierung thermaler Tiefengrundwasserleiter

Johannes Birner, Alexandros Savvatis und Michael Schneider

Keywords: Pumpversuchsauswertung, Hydraulik, Thermalgrundwasserleiter, Normierung

Zusammenfassung

Ein Normierungsverfahren für die Auswertung von hydraulischen Pumpversuchsdaten aus thermalen Tiefengrundwasserleitern wird vorgestellt. Es ermöglicht thermal beeinflusste Standrohrspiegelhöhen in einer Bohrung während eines hydraulischen Tests in hydrostatische Drücke eines Grundwasserleiters umzurechnen. Berechnungsmethoden zur Quantifizierung von brunnenspezifischen Einflüssen, wie sie bei Einbohrlochverfahren auftreten, werden vorgestellt und diskutiert. Die geohydraulischen Parameter werden unter Berücksichtigung der thermalen und technischen Beeinflussungen ermittelt. Die Anwendung wird exemplarisch an Pumpversuchsdaten der Forschungsbohrung Altdorf demonstriert.

1. Einleitung

Die Exploration tiefer hydrogeothermischer Ressourcen wurde in Deutschland in den letzten Jahren deutlich forciert. Vor allem im süddeutschen Molassebecken wurden mehrere Projekte zur Produktion von Fernwärme (Riem, Pullach) und Strom (Unterhaching) aus thermalen Tiefengrundwasserleitern realisiert. Zur Qualitätsverbesserung bei der Projektplanung geothermischer Anlagen und zur Abschätzung des Fündigkeitsrisikos wurde im Jahr 2006 mit dem Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland (GeotIS) begonnen. Ziel des Informationssystems ist die Bereitstellung von Fündigkeitsvorhersagen an frei wählbaren Lokalitäten (AGEMAR et al., 2007). Die Fündigkeit von geothermischen Anlagen hängt von der Qualität des Fluids und der Temperatur des Reservoirs, vor allem aber von der maximalen Förderrate ab (SCHULZ, 2007). Diese wird durch die geohydraulischen Eigenschaften des thermalen Tiefengrundwasserleiters (TGWL) bestimmt. Die Prozessierung der Messdaten eines hydraulischen Tests und die Quantifizierung der hydraulischen Parameter eines thermalen Tiefengrundwasserleiters wird im Folgenden exemplarisch gezeigt.

2. Datenprozessierung

2.1 Datengrundlage

Die verwendeten Daten stammen aus der Forschungsbohrung Altdorf bei Landshut in Niederbayern, welche in den Jahren 1999 und 2000 im Auftrag des bayerischen Landesamtes für Umwelt abgeteuft wurde. Die 796 m tiefe Bohrung erschließt unter tertiärer Überlagerung in einer Tiefe von 400,60 m u. GOK die ca. 380 m mächtigen Karbonate des Malm Alpha bis Zeta und endet im Dogger, von dem nur die ersten 12 m aufgeschlossen sind (Abbildung 1). An der Oberkante des Malms beträgt die maximale Wassertemperatur im Bohrloch ca. 58 °C und nahe der Endteufe ca. 71 °C. Daraus errechnet sich ein mittlerer geothermischer Gradient von 3,3 °C pro 100 m für den Malm. Der durchschnittliche Gradient für die hangenden tertiären Sedimente beträgt ca. 12,5 °C pro 100 m. Die Hauptwasserzutritte wurden mittels Fluid-Logging im Übergangsbereich von tertiären Basissanden und Malm zwischen 395 und 405 m u. GOK und im Malm zwischen 460 und 490 m u. GOK ermittelt (WROBEL et al., 2002). Nach dem Ausbau der Bohrung zu einer Grundwassermessstelle (Abbildung 1) wurde vom 18.09. bis 26.09.2000 ein Pumpversuch mit einer annähernd konstanten Förderrate durchgeführt. Die Förderrate variierte aufgrund von Leistungsschwankungen der 6" Unterwasserpumpe und Reduzierung des Förderstroms für Probenahmen um einen mittleren Wert von 8,95 l/s. Die Einbautiefe der Pumpe wird mit ca. 100 m u. GOK angegeben. Die

Wassertemperatur im Bohrloch wurde während des Tests sowohl am Auslauf der Pumpe, wie auch an der Grundwasseroberfläche gemessen. Die Aufzeichnung der Wasserspiegelstände im Bohrloch erfolgte manuell mittels eines Kabellichtlotes.

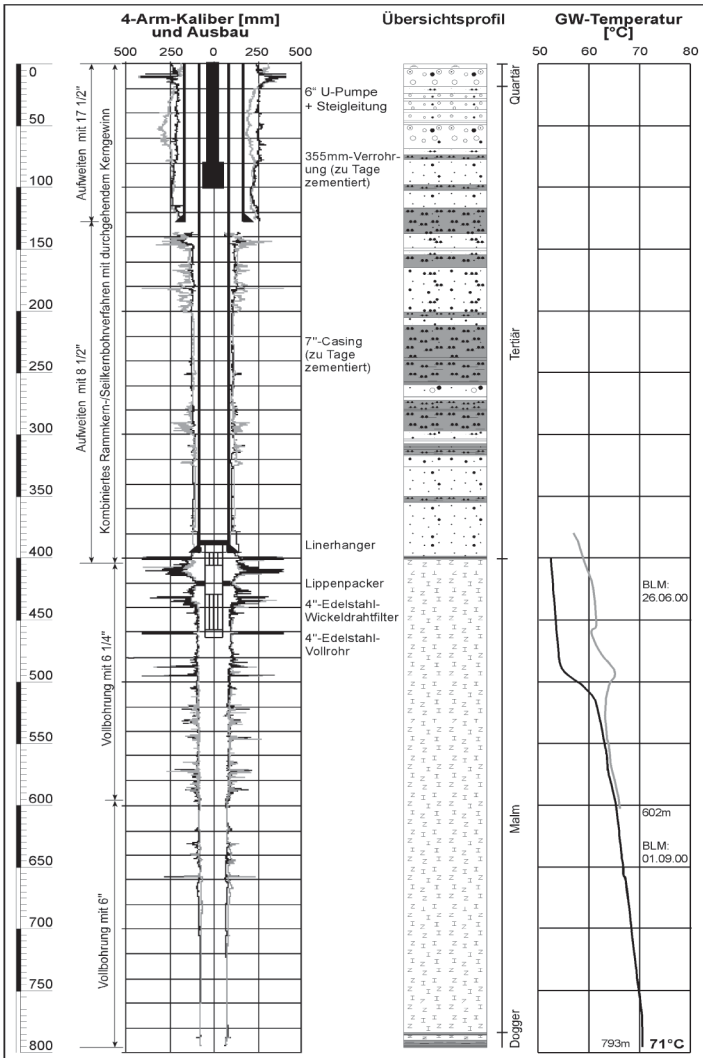


Abb. 1: Ausbau und Übersichtsprüfil der FB Altdorf mit ausgewählten Temperaturlogs (modifiziert nach WROBEL et al., 2002)

2.2 Normierung der Standrohrspiegelhöhen in tiefen Bohrungen

Der gemessene Wasserstand in der Bohrung entspricht dem hydrostatischen Druck im TGWL in abhängig von der Dichte des Wassers in der Bohrung. Mit Beginn der Thermalwasserförderung sinkt die Dichte des Wassers im Bohrloch ab und anstelle einer erwarteten

Absenkung wird ein Ansteigen des Wasserspiegels beobachtet (Abbildung 2). Dieses Phänomen wird durch die Normierung der Dichte und Druckbedingungen im Bohrloch auf Modellwasserbedingungen korrigiert. Als Modellwasser wird ein Wasser mit einer Temperatur T von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, bei einem Druck p von 1 bar und mit einer Mineralisation von $0,5\text{ kg/m}^3$ gewählt. Daraus ergibt sich eine Dichte $\rho_{\text{MW}} = 1000,227\text{ kg/m}^3$.

Der Top des Grundwasserleiters wird als Referenzpunkt der Berechnungen zur Normierung gewählt, um die Änderungen von Druck und Temperatur über die gesamte Wassersäule im Bohrloch zu berücksichtigen. Der dort herrschende hydrostatische Druck p_{TGWL} ist unabhängig von der Temperatur der Wassersäule. An der Oberkante des Grundwasserleiters ist demnach der Druck einer Wassersäule mit einer Temperatur $T > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ gleich dem Druck einer Modellwassersäule.

$$p_{\text{TGWL}} = p_{\text{TGWL}}^{\text{MW}} \quad (1)$$

hierin bedeuten:

p_{TGWL}	=	Druck am Top-Grundwasserleiter mit einer Temperatur von T
$p_{\text{TGWL}}^{\text{MW}}$	=	Druck am Top-Grundwasserleiter unter Modellwasserbedingungen

Die Standrohrspiegelhöhe einer Modellwassersäule lässt sich nach folgender Formel aus den Daten einer Abstichmessung berechnen:

$$h^{\text{MW}} = \frac{\rho}{\rho^{\text{MW}}} \cdot \Delta H + h_{\text{TGWL}} \quad [\text{m ü. NN}] \quad (2)$$

hierin bedeuten:

h^{MW}	=	Standrohrspiegelhöhe Modellwassersäule
ρ^{MW}	=	Dichte Modellwasser ($1000,227\text{ kg/m}^3$)
ρ	=	Dichte der warmen Wassersäule
ΔH	=	Höhendifferenz zwischen Grundwasseroberfläche und Top-Grundwasserleiter
h_{TGWL}	=	geodätische Höhe des Top-Grundwasserleiter

Die Dichte der warmen Wassersäule wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\rho = \rho^T + \Delta\rho^P + c_f \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3)$$

hierin bedeuten:

ρ	=	Dichte der warmen Wassersäule
ρ^T	=	Dichte bei einer mittleren Temperatur der Wassersäule
$\Delta\rho^P$	=	Änderung der Dichte aufgrund des Druckes der Wassersäule
c_f	=	Konzentration der festen gelösten Stoffe

Die Dichte des Wassers zwischen Grundwasseroberfläche und Top-Grundwasserleiter wird über eine Virialgleichung aus der mittleren Temperatur des Abschnitts berechnet. Die Änderung der Dichte durch den Druck wird durch einen Iterationsalgorithmus bestimmt. Temperatur- und Druckzunahme mit der Tiefe werden als linear angenommen.

2.3 Anwendungsbeispiel Forschungsbohrung Altdorf

In Abbildung 2 sind neben den gemessenen auch die normierten Standrohrspiegelhöhen (Modellwasser) des Pumpversuches FB Altdorf vom 18.09. bis 26.09.2000 aufgetragen. Die gemessenen Wasserstände zeigen nach einem anfänglichen Abfall einen stetigen Anstieg des Wasserspiegels aufgrund der Verringerung der Dichte der Wassersäule durch die Thermalwasserförderung. Nach der Normierung der Fluidichte auf einen Wert $\rho_{MW} = 1000,227 \text{ kg/m}^3$ lässt der Kurvenverlauf ein stetiges Abfallen der Wasserstände erkennen, wie es bei einem Pumpversuch zu erwarten ist.

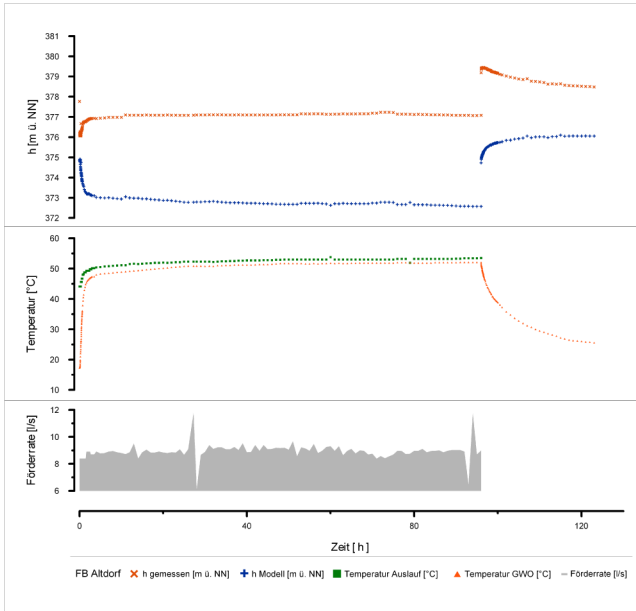


Abb. 2: Pumpversuchsdiagramm PV Malm mit Temperaturverlauf.

Parameter des Normierungsprozesses:

- Werte der Abstichsmessung
- Temperatur am Top-Grundwasserleiter
- Temperatur an der Grundwasseroberfläche
- Gesamtlösungsinhalt
- Förderrate
- Parameter des Brunnenausbaus (Rohrlängen, Durchmesser, Rohrrauigkeit usw.)

Die Parameter können bis auf die Temperaturbedingungen am Top des Grundwasserleiters und die Rohrrauigkeit alle quantitativ bestimmt werden. Die Rohrrauigkeit wurde nach SCHRÖDER (1994) auf eine äquivalente Sandrauigkeit k von $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ (Stahl nahtlos gezogen) abgeschätzt. Die Temperaturbedingungen an der Oberkante des Grundwasserleiters müssen ebenfalls abgeschätzt werden. Nach einmaligem Austausch des Bohrlochvolumens ($t > 12 \text{ min.}$) wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die am Auslauf gemessene Temperatur in etwa der Temperatur auf Höhe des Top-GWL entspricht. Die Temperatur wird

ab diesem Zeitpunkt als isotherm zwischen Einlauf U-Pumpe und Grundwasserleiter angenommen werden.

3 Bestimmung geohydraulischer Parameter

Bei der Erkundung, Erschließung und Nutzung von tiefen Grundwasservorkommen ist nach EINSELE et al. (1983) zu beachten, dass sich mit der Tiefe auch die physikalischen Eigenschaften des Wassers durch Druck und Temperatur verändern. Bei thermalen Tiefengrundwasserleitern wird daher nicht von Transmissivität sondern von Transmissibilität als Produkt von Permeabilität und Mächtigkeit des Grundwasserleiters gesprochen. Die hydraulischen Eigenschaften lassen sich dadurch vom Fluid unabhängig beschreiben.

Bei einem hydraulischen Test in einem TGWL stehen zur Auswertung in der Regel nur Messwerte aus der Produktionsbohrung zur Verfügung. Dies limitiert die Aussagequalität der Daten, da die gemessenen Absenkungsverläufe im Brunnen nicht dem Druckverlauf im Grundwasserleiter entsprechen, sondern durch brunnenspezifische Phänomene, wie z.B. Skineffekt und Rohrreibung, überlagert werden. Eine Interpretation und Auswertung der Daten bedingt eine Quantifizierung und Eliminierung dieser Einflüsse. Variierende Förderraten sind ein weiterer unquantifizierbarer Einfluss auf den dynamischen Wasserspiegel in der Bohrung.

Tab. 1: Parameter und Ergebnisse der Druckverlustberechnung durch Rohrreibung ($t = 15$ min)

	Rohr 1	Rohr 2
Länge [m]	285,4	15,2
Durchmesser [m]	0,159	0,100
Fließregime [m/s]	0,0073	0,0062
Reynoldyzahl	92030	172594
Rohrreibung λ (nach Hermann)	0,0182	0,0160
Fließregime	turbulent	turbulent
Strömungszustand	hydraulisch glatt	hydraulisch glatt
Druckverlust [Pa]	2912	1381

3.1 Bestimmung von brunnenspezifischen Einflüssen

Die Wasserstände im Brunnen werden durch Rohrreibung und Skineffekt signifikant beeinflusst. Diese Phänomene hängen, wie auch die Brunnenspeicherung, vom Brunnenausbau und dem hydraulischen Anschluss der Bohrung an den Grundwasserleiter ab. Eine Spezifizierung dieser Größen ist für die Berechnung des Speicherkoeffizienten unabdingbar.

3.1.1 Druckverlust durch kontinuierliche Rohrreibung

Nach BOHL & ELMENDORF (2005) kann gezeigt werden, dass sich die Dissipationsverluste bei inkompressiblen Strömungen als Druckverluste äußern. Dies bedeutet, dass der reale (im Bohrloch gemessene) Druck am Ende der Stromröhre um einen Druckabfall „ p_{RR} “ kleiner ist als der hydrostatische Druck p_{TGWL} bei idealer, reibungsfreier Strömung. Die Eliminierung der Druckverluste durch kontinuierliche Rohrreibung bewirkt in der FB Altdorf positive Verschiebung ($\Delta h = 43$ cm) der Druckhöhen (Abbildung 3). Die Parameter und Ergebnisse der Druckverlustberechnung durch kontinuierliche Rohrreibung zum Zeitpunkt $t = 15$ min sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

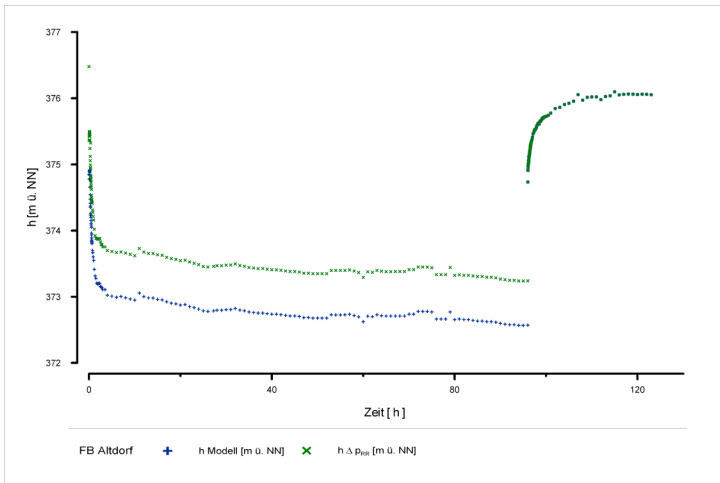


Abb. 3: Standrohrspiegelhöhen vor und nach Eliminierung des Druckverlustes durch kontinuierliche Rohrreibung.

3.1.2 Skineffekt

Nach VAN EVERDINGEN (1953) versteht man unter dem Skineffekt einen zeitlich unabhängigen zusätzlichen Druckverlust oder Druckaufbau in der Bohrung, der proportional zum Förderstrom ist. Der Skineffekt definiert die Differenz zwischen dem dynamischen Wasserspiegel in der Bohrung und der Absenkung im unmittelbar an die Bohrung angrenzenden Bereich des Grundwasserleiters. Der Skineffekt ist hydraulisch daher ein endlicher Ringraum mit veränderter Durchlässigkeit k_r und Radius r_w , um die Bohrung (HAWKINS, 1956). Seine Größe wird über den dimensionslosen Skinfaktor S_F beschrieben.

$$\Delta s_{Skin} = S_F \cdot \left(\frac{Q}{2\pi T} \right) \quad [m] \quad (4)$$

hierin bedeuten:

Δs_{Skin}	=	Skineffekt
S_F	=	dimensionsloser Skinfaktor
Q	=	Förderrate
T	=	Transmissivität

Der Skinfaktor kann nach STRAYLE (1983) sowohl aus der Absenkungsphase, wie auch aus dem Wiederanstieg berechnet werden. In der Bohrung AItldorf lässt sich ein sehr geringer positiver Skinfaktor ermittelt, der sich unter Berücksichtigung der Druckverluste durch kontinuierliche Rohrreibung verringert. Dies belegt eine gute hydraulische Anbindung der Bohrung an den TGWL, wie sie für ein offenes Bohrloch zu erwarten ist.

3.2 Hydraulische Modellvorstellung und geohydraulische Parameter des TGWL

Das Ziel eines hydraulischen Tests ist die Beschreibung eines unbekanntes Systems durch die indirekte Messung der Reaktion des Systems auf eine Aktion, wie zum Beispiel die

Druckabnahme im TGWL durch Förderung von Wasser. Die Lösung der Fragestellung impliziert einen Identifikationsprozess unter Verwendung von Modellen, deren Verhalten den beobachteten Reaktionen des unbekanntes Systems entsprechen. Die Modelle definieren dabei das hydraulische Verhalten während der Aktion. Eine Identifikation des hydraulischen Modells und dessen zeitliche Entwicklung ist für eine Auswertung unabdingbar, da die hydraulischen Modelle nicht den geologischen Modellen entsprechen müssen. Bei komplexen Bedingungen werden zum Teil mehrere Modelle für die Interpretation benötigt, um das zeitliche Druckverhalten des TGWL hinreichend beschreiben zu können (Bourdet, 2002).

Die ersten Messwerte bis $t = 12$ min können für eine Interpretation des hydraulischen Modells aufgrund der beschriebenen Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Temperatur auf Höhe des TGWL nicht herangezogen werden. Die Derivate zeigen ab diesem Zeitpunkt einen Kurvenverlauf, wie er für eine Bohrung mit Brunnenspeicherung und Skin in einem homogenen Grundwasserleiter charakteristisch ist (BOURDET et al., 1983a). Es lassen sich zwei Fließregime unterscheiden. In der Anfangsphase des Pumpversuchs ist die Absenkung von der Brunnenspeicherung geprägt. Der Übergang in ein radiales Fließregime eines homogenen Grundwasserleiters ist durch die Stabilisierung der Derivate auf einer horizontalen Geraden gekennzeichnet.

Die Ermittlung der geohydraulischen Parameter erfolgt nach der Methodik von PAPADOPULOS & COOPER (1967) und ermöglicht eine Bestimmung der Transmissibilität und des Speicherkoeffizienten unter Berücksichtigung der brunnenspezifischen Einflüsse durch eine Determinierung von Brunnenradius und wirksamen Radius als Einfluss des Skineffekts.

Der Kurvenverlauf der Wiederantiegsporoide entspricht einem radialen Strömungsregime in einem homogenen Grundwasserleiter. Die durch die Förderung bedingten Störeinflüsse haben auf den Kurvenverlauf keine Auswirkung mehr. Die aus dem Wiederanstieg berechnete Transmissibilität ist etwas geringer, als der aus der Absenkung ermittelte Wert.

Literaturverzeichnis

- AGEMAR, T., ALTEN, J.A., KÜHNE, K., MAUL, A.A., PESTER, S., WIRTH, W. & SCHULZ, R. (2007): Development of a Geothermal Information System for Germany. - Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany: 7 S.
- BOHL, W. & ELMENDORF, W. (2005): Technische Strömungslehre: 504 S.; Würzburg (Vogel).
- BOURDET, D.P., WHITTLE, T.M. & PIRARD, Y.M (1983a): A new set of type curves simplifies well test analysis. – World Oil, 5: 77-87; Husten.
- BOURDET, D.P. (2002): Well test analysis – The use of advanced interpretation models: 426 S.; Amsterdam (Elsevier).
- EINSELE, G., JOSOPAIT, V., SEILER, K. P. & WERNER, J. (1983): Tiefe Grundwässer. Bedeutung, Begriffe, Eigenschaften, Erkundungsmethoden. – DVWK-Schriften, **61**: 1-108; Hamburg & Berlin (Parey).
- HAWKINS JR., M.F. (1956): A note on the Skin Effect. – Trans. AIME, **207**: 356-357; New York.

SCHULZ R., JUNG R., PESTER S., & SCHELLSCHMIDT R. (2007): Quantification of Exploration Risks for Hydrogeothermal Wells. – Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany; 6 S.

SCHRÖDER, RALPH C.M. (1994): Technische Hydraulik – Kompendium für den Wasserbau: 208 S.; Berlin (Springer).

STRAYLE, G (1983): Pumpversuche im Festgestein. – DVGW-Schriftenreihe **34**: 305-327; Frankfurt/M.

PAPADOPULOS, I.S. & COOPER JR., H.H. (1967): Drawdown in a well of large diameter. – Water Resources Res., **3** (1): 241-244.

VAN EVERDINGEN, A.F. (1953): The Skin Effect and its influence on the Productive Capacity of a well. – Trans. AIME, **198**: 171-176; New York.

WROBEL, J.-P., FRITZER, T., MIKULLA, C., SCHULDES, D. & SUCKOW, A. (2002): Forschungsbohrung Altdorf bei Landshut/Niederbayern – Erkundung einer geothermischen Anomalie im Bereich des Landshut-Neuöttinger-Hochs. – Grundwasser, **7** (1): 14-24; Heidelberg.

Dipl.-Geol. Johannes Birner; FU Berlin; AB Hydrogeologie; Malteser Str. 74-100; 12249 Berlin
E-Mail: birner@zedat.fu-berlin.de