



## Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenanlagen - Grundlage für effiziente Planung und Ausführung

Christoph Rosinski, Franz Josef Zapp

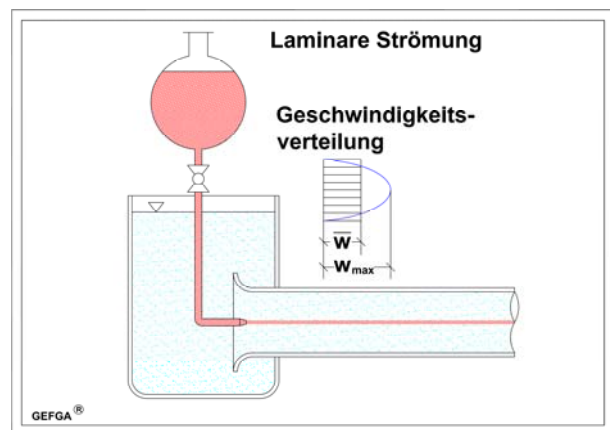
GEFGA mbH, Gesellschaft zur Entwicklung  
und Förderung von Geothermen Anlagen  
Löhrigasse 11, 65549 Limburg, info@gefga.de

### Zusammenfassung

An Hand hydraulischer Betrachtungen an Erdwärmesonden unterschiedlicher Bauart und Dimension, werden im folgenden Beitrag verschiedenartige Einflüsse auf die Wärmeübertragungsfähigkeit von Erdwärmesonden dargestellt. Es wird der Einfluss von laminarer und turbulenter Rohrströmung auf die Wärmeübertragungsfähigkeit von Erdwärmesonden erläutert. Diese Betrachtungen berücksichtigen verschiedene Parameter, wie die Auswirkung verschiedenartiger Frostschutzmittel und die unterschiedlichen Bautypen von Erdwärmesonden.

### 1 Einleitung

Der Wärmeübergang in einem Wärmeübertrager wird im Wesentlichen von der Strömungsart des wärmeübertragenden Mediums (Fluid) beeinflusst. Grundsätzlich können sich zwei unterschiedliche Arten von Strömungen einstellen. Bei der Art der Strömung wird unter laminarer und turbulenter Strömung unterschieden. Welche Strömungsart vorherrscht, wird durch eine, von der Strömungsgeschwindigkeit, der Viskosität, der Dichte des Mediums und einer charakteristischen Länge (hydraulischer Durchmesser) bestimmte Kenngröße, der Reynold-Zahl, bestimmt. Der Unterschied zwischen einem Wärmeübergang bei einer laminaren Strömung und einer turbulenten Strömung ist nicht unwesentlich.



#### 1.1 Laminare Strömung

Bei der laminaren Strömung bewegen sich die Fluidteilchen auf zur Rohrachse parallelen Stromlinien ohne sich untereinander zu vermischen. Würde man bei der laminaren Strömungsform den Reibungsverlust messen, so würde man bei unterschiedlich rauen Rohren mit gleichem Durchmesser und der gleichen Länge feststellen, dass der Rohrreibungsverlust unabhängig von der Rauigkeit der Rohrwandungen ist. Misst man die Geschwindigkeitsverteilung, so ergibt sich bei laminarer Strömung eine Verteilung in Parabelform. Bei kreisrunden Rohren tritt die laminare Strömung unterhalb der kritischen Reynold-Zahl  $Re_{krit} = 2320$  auf.

Die laminare Strömungsform lässt sich anhand eines Versuches von Reynold, der in *Bild 1* dargestellt ist, erläutern.

Der in die Rohrachse eingebrachte Farbstrahl vermischt sich nicht mit der Grundströmung, die Strömung ist laminar.

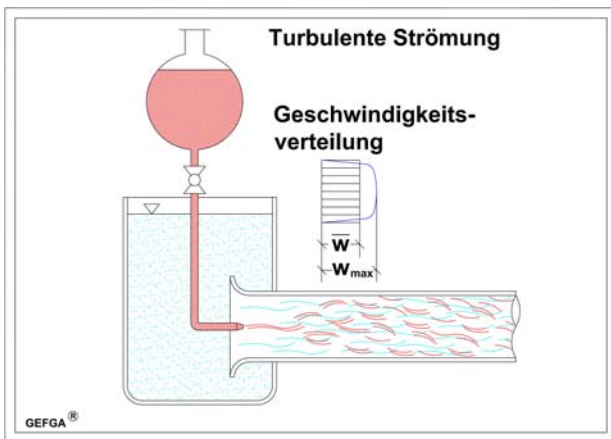
**Bild 1:** zeigt den Versuch von Reynold zur Darstellung der laminaren Rohrströmung.

#### 1.2 Turbulente Strömung

Bei der turbulenten Strömung treten neben der in Rohrachse gerichteten Transportbewegung auch Querbewegungen auf, die zur ständigen Vermischung der Strömungsteilchen führen. Ein in Rohrachse gegebener Farbstrahl zerfällt und vermischt sich mit der Grundströmung (Abbildung 2).

Im Gegensatz zur laminaren Strömung hängt bei dieser Strömungsform der Rohrreibungsverlust von der Wandrauigkeit ab. Die Geschwindigkeitsverteilung ist gleichmäßiger, dies bedeutet sie ist abgeflachter als bei der Laminarströmung.

Die turbulente Strömungsform tritt oberhalb der kritischen Reynold-Zahl  $Re_{krit} > 2320$  auf.



**Bild 2:** zeigt den Versuch von Reynold zur Darstellung der turbulenten Rohrströmung.

Die Ermittlung der Größe der Reynold-Zahl, erfolgt nach Formel 1:

$$Re = \frac{\bar{w} \cdot d}{\nu}$$

Wobei  $Re$  = Reynold-Zahl,  $\bar{w}$  = mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s],  $d$  = hydraulischer Durchmesser [m],  $\nu$  = kinematische Viskosität [m<sup>2</sup>/s]

Liegt die Reynold-Zahl unter einem Wert von 2320, kann von einer laminaren Strömung ausgegangen werden, liegt die Zahl über 2320, liegt in der Regel eine turbulente Strömung vor.

## 2 Wärmeübertrager Erdwärmesonde.

Gewöhnlich werden zur Berechnung des Energieflusses vom Untergrund zur Erdwärmesonde ausschließlich geologische Gegebenheiten berücksichtigt: Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes wird abgeleitet aus Kartenmaterial, aus Schichtenfolgen bekannter Bohrungen bzw. Resonsetests. Nicht berücksichtigt bei der Bewertung der Wärmeübertragung werden in der Regel die Geometrie der Erdwärmesonde, die sich einstellenden Strömungsverhältnisse in den Erdwärmesonden sowie das verwendete Wasser-Frostschutz-Gemisch. Anhand hydraulischer Berechnungen kann dieser Einfluss der Bauart und Dimension verschiedener Erdwärmesonden, der Strömungsverhältnisse sowie des Wärmeträgermittels dargestellt werden.

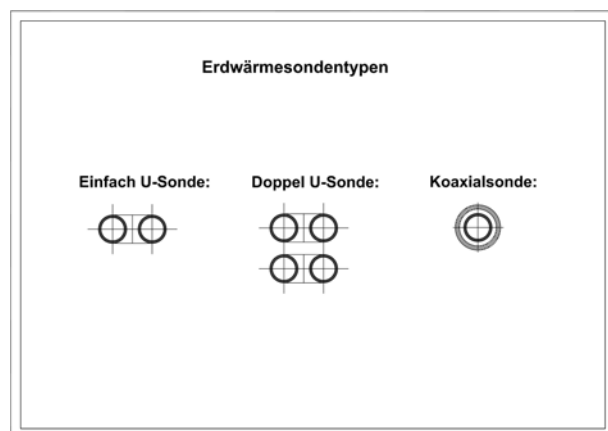
In der VDI 4640, Thermische Nutzung des Untergrundes, werden zur Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes eine Vielzahl von Stoffwerten angegeben. Es werden auch unterschiedliche Geometrien von Erdwärmesonden dargestellt. Stoffwerte zur Bestimmung der Strömungsverhältnisse in den Erdwärmesonden werden in der VDI 4640 nicht zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus fehlen Aussagen über den Einfluss der Geometrie der Erdwärmesonden auf die Wärmeübertragung an den Unter-

grund. In der VDI 4640 wird unter *Abschnitt 5.1 Auslegung* ein Hinweis auf den Einfluss der Bauart und der Strömungsart gegeben. In diesem Abschnitt wird darauf hingewiesen, dass in der Erdwärmesonde ein laminarer Fluss verhindert werden soll.

Die Wärmeübertragung von der Erdwärmesonden-Innenseite auf den Wärmeträger (Wasser-Frostschutz-Gemisch) wird durch die vorherrschende Strömungsart bestimmt.

### 2.1 Bauarten von Erdwärmesonden

Die Erdwärmesonde stellt einen Wärmeübertrager dar, der über eine Bohrung in den Untergrund eingebracht wird. Dabei wird die Erdwärmesonde im Bohrloch mit einer Verpressmasse im Idealfall vollständig und formschlüssig mit der Bohrlochwand verbunden. Durch das Einbringverfahren der Erdwärmesonden in den Untergrund über Vertikalbohrungen haben sich Bündelrohrsonden als geeignet erwiesen. In Deutschland werden üblicherweise Erdwärmesonden in der Bauart Einfach U-Sonde, Doppel U-Sonde und Koaxialsonden verwendet. Der meistverwendete Typ ist die Doppel U-Sonde in der Nennweite da 32.



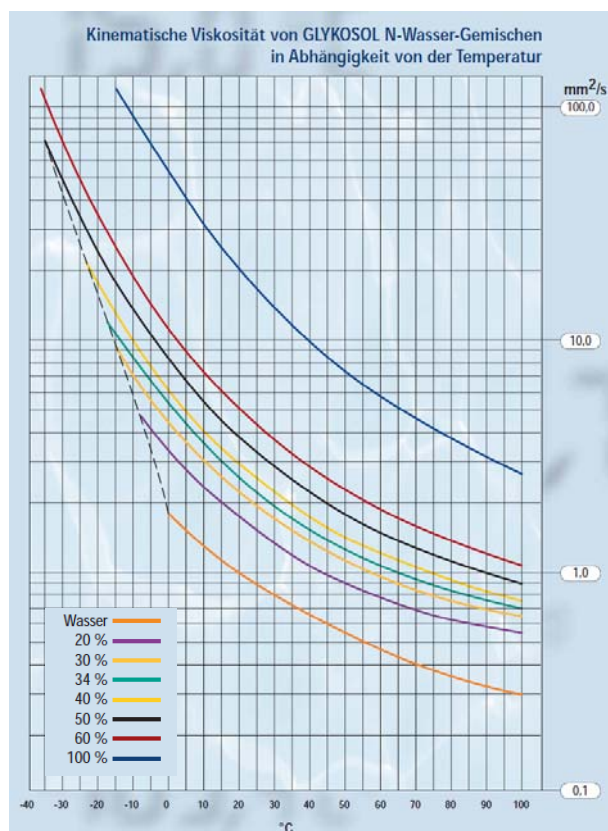
**Bild 3:** Bauarten von Erdwärmesonden

### 2.2 Wärmeträgermittel

Zum Energietransport wird ein Medium benötigt. Dieses Medium kann, auf Grund der Art des Verfahrens (Sole oder Direktverdampfung) unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Das Wärmeträgermittel muss für den Einsatz in Erdwärmesonden bestimmte Kriterien erfüllen wie zum Beispiel: hohe Wärmekapazität, gute Strömungseigenschaften, nicht Wasser gefährdend, Frostsicherheit, nicht korrosiv gegenüber den im System verbauten Materialien. Alle möglichen Wärmeträger haben untereinander Vor- bzw. Nachteile. Wasser besitzt die besten Eigenschaften in Bezug auf Strömungseigenschaften, ist nicht Wasser gefährdend, ist kostengünstig und leicht verfügbar, hat jedoch einen relativ hohen Gefrierpunkt und ist dadurch nur bedingt



einsetzbar. Gemische aus Wasser und Frostschutzmittel wie Ethylenglycol, Ethanol, Methanol, Propylenglycol, Kaliumchlorid, Calciumchlorid verfügen über einen niedrigeren Gefrierpunkt, weisen jedoch Nachteile in den Eigenschaften Wärmekapazität, gute Strömungseigenschaften, nicht Wasser gefährdend, Frostsicherheit, nicht korrosiv gegenüber den im System verbauten Materialien gegenüber Wasser auf. In der Regel wird in Deutschland als Wärmeträger ein Gemisch aus Wasser-Ethylenglycol verwendet. Das Mischungsverhältnis wird durch den gewählten Gefrierpunkt bestimmt. Die Viskosität (Zähflüssigkeit) des Wärmeträgermittels ändert sich mit dem Mischverhältnis und der Medientemperatur. Die Reynold-Zahl wird mit der Viskosität bestimmt. Je kleiner die Viskosität ist, desto größer wird die Reynold-Zahl. Als Beispiel für die Anhängigkeit der Viskosität ist nachfolgend ein Diagramm für Wasser-Ethylenglycol der Firma pro Kühlsole dargestellt.



**Bild 4:** Diagramm Kinematische Viskosität  
 Quelle: GLYKOSOL N Datenblatt pro Kühlsole

Für andere Gemische gilt dies analog. Wobei Gemische (Salzlösungen) wie Kaliumchlorid, Calciumchlorid tendenziell eine geringere Viskosität wie Gemische aus Ethylenglycol, Ethanol, Methanol, aufweisen. Gemische aus Propylenglycol sind auf Grund der hohen Viskosität im Arbeitsbereich (+5°C bis -5°C) für Erdwärmesondenanlagen nicht geeignet.

### 3 Hydraulische Auslegung von Sonden

Auf Grund der Vielzahl von Ausführungsvarianten, bedingt durch Leistungsanforderung, Beschränkung der Bohrtiefe, Anzahl der Sonden, Bauart der Sonde, gewähltes Wärmeträgermittel, Einsatztemperatur etc. ist es nicht möglich eine generelle Aussage über das Strömungsverhalten in der Erdwärmesonde zu treffen. Zur Verbesserung der Wärmeübertragung ist es, zumindest für Rohrbündelsonden wie Einfach u. Doppel-U-Sonden notwendig eine turbulente Strömung zu erzeugen.

#### 3.1 Berechnung der Reynold-Zahl

Die Bestimmung der Reynold-Zahl erfolgt über die Formel:

$$Re = \frac{\bar{w} \cdot d}{\nu}$$

$Re$  = Reynold-Zahl

$\bar{w}$  = Strömungsgeschwindigkeit

$d$  = Durchmesser (hydraulischer Durchmesser)

$\nu$  = kinematische Viskosität

Eine turbulente Strömung liegt bei einer Reynold-Zahl > 2320 vor.

**Beispiel 1:** Ein Wohngebäude mit einer Heizleistung von 6 kW soll mit einer Erdwärmesondenanlage beheizt werden. Als Wärmeträgermittel wird eine Wasser-Ethylenglycol-Gemisch, Frostsicher bis -14°C vorgesehen. Der COP-Wert der Wärmepumpe wird für die Auslegung der Erdwärmeanlage mit 4 angenommen. Die spezifische Entzugsleistung wird für den Standort mit 45 W/m bestimmt. Als Erdwärmesonde ist eine Doppel-U-Sonde da 32x2,9 vorgesehen. Der Arbeitspunkt ist mit 0°C vorgesehen, die Temperaturdifferenz VL-RL soll 3K betragen. Aus den Vorgaben ergeben sich nachfolgende Parameter:

Entzugsleist.,  $q_s$ : = 6 kW\*(1-1/4) = 4,5 kW  
 Sondenlänge,  $l_s$ : = 4,5 kW / 45 W/m = 100 m  
 Wärmekapaz.  $C$ : aus Stoffwerten: 3,8 kJ/kgK  
 Dichte,  $\rho$ : aus Stoffwerten: 1.045 kg/m<sup>3</sup>  
 Temp. Diff.  $\Delta T$ : 3K  
 Massenstrom,  $m$  =  $q_s / C / \rho / \Delta T$  = 0,378 l/s; 1,36m<sup>3</sup>/h  
 Durchmesser  $d_i$  = 32 mm - 2\*2,9mm = 26,2 mm  
 Geschwindigkeit  $w$  =  $m / \pi * 4 / d_i^2$  = 0,35 m/s  
 Viskosität  $\nu$ : aus Stoffwerten: 4 mm<sup>2</sup>/s

Reynold-Zahl  $Re$  = 2296

Die Reynold-Zahl liegt im Beispiel 1 unterhalb dem kritischen Wert von 2320. Die Strömungsart wird laminar sein.



Beispiel 2: Wie Beispiel mit angepasstem Massenstrom durch Variation der Temperaturspreizung von 3K auf 2,5K

Entzugsleist.,  $q_s$ : =  $6 \text{ kW} \cdot (1-1/4) = 4,5 \text{ kW}$   
 Sondenlänge,  $l_s$ : =  $4,5 \text{ kW} / 45 \text{ W/m} = 100 \text{ m}$   
 Wärmekapaz.  $C$ : aus Stoffwerten:  $3,8 \text{ kJ/kgK}$   
 Dichte,  $\rho$ : aus Stoffwerten:  $1.045 \text{ kg/m}^3$   
 Temp. Diff.  $\Delta T$ :  $2,5\text{K}$   
 Massenstrom,  $m$  =  $q_s/C / \rho/\Delta T = 0,454 \text{ l/s}; 1,63\text{m}^3/\text{h}$   
 Durchmesser  $d_i$  =  $32 \text{ mm} - 2 \cdot 2,9\text{mm} = 26,2 \text{ mm}$   
 Geschwindigkeit  $w = m/2/\pi \cdot 4/d_i^2 = 0,42 \text{ m/s}$   
 Viskosität  $v$ : aus Stoffwerten:  $4 \text{ mm}^2/\text{s}$

Reynold-Zahl  $Re = 2751$

Die Reynold-Zahl liegt im Beispiel 2 über dem kritischen Wert von 2320. Die Strömungsart wird turbulent sein.

Beispiel 3: Wie Beispiel 2, jedoch konnte aus bohrtechnischen Gründen keine 100 Meter Bohrung realisiert werden. Es wurden stattdessen 2 x 55 Meter gebohrt. Der Massenstrom verteilt sich somit auf zwei Sonden

Entzugsleist.,  $q_s$ : =  $6 \text{ kW} \cdot (1-1/4) = 4,5 \text{ kW}$   
 Sondenlänge,  $l_s$ : =  $4,5 \text{ kW} / 45 \text{ W/m} = 100 \text{ m}$   
 Wärmekapaz.  $C$ : aus Stoffwerten:  $3,8 \text{ kJ/kgK}$   
 Dichte,  $\rho$ : aus Stoffwerten:  $1.045 \text{ kg/m}^3$   
 Temp. Diff.  $\Delta T$ :  $2,5\text{K}$   
 Massenstrom,  $m$  =  $q_s/C / \rho/\Delta T = 0,454 \text{ l/s}; 1,63\text{m}^3/\text{h}$   
 m je Sonde =  $0,227 \text{ l/s}; 0,82\text{m}^3/\text{h}$   
 Durchmesser  $d_i$  =  $32 \text{ mm} - 2 \cdot 2,9\text{mm} = 26,2 \text{ mm}$   
 Geschwindigkeit  $w = m/2/\pi \cdot 4/d_i^2 = 0,21 \text{ m/s}$   
 Viskosität  $v$ : aus Stoffwerten:  $4 \text{ mm}^2/\text{s}$

Reynold-Zahl  $Re = 1376$

Die Reynold-Zahl liegt im Beispiel 3 erheblich unter dem kritischen Wert von 2320. Die Strömungsart wird laminar sein.

Beispiel 4: Wie Beispiel 3, jedoch mit einer Einfach-U-Sonde da 32.

Entzugsleist.,  $q_s$ : =  $6 \text{ kW} \cdot (1-1/4) = 4,5 \text{ kW}$   
 Sondenlänge,  $l_s$ : =  $4,5 \text{ kW} / 45 \text{ W/m} = 100 \text{ m}$   
 Wärmekapaz.  $C$ : aus Stoffwerten:  $3,8 \text{ kJ/kgK}$   
 Dichte,  $\rho$ : aus Stoffwerten:  $1.045 \text{ kg/m}^3$   
 Temp. Diff.  $\Delta T$ :  $2,5\text{K}$   
 Massenstrom,  $m$  =  $q_s/C / \rho/\Delta T = 0,454 \text{ l/s}; 1,63\text{m}^3/\text{h}$   
 m je Sonde =  $0,227 \text{ l/s}; 0,82\text{m}^3/\text{h}$   
 Durchmesser  $d_i$  =  $32 \text{ mm} - 2 \cdot 2,9\text{mm} = 26,2 \text{ mm}$   
 Geschwindigkeit  $w = m/\pi \cdot 4/d_i^2 = 0,42 \text{ m/s}$   
 Viskosität  $v$ : aus Stoffwerten:  $4 \text{ mm}^2/\text{s}$

Reynold-Zahl  $Re = 2751$

Die Reynold-Zahl liegt im Beispiel 4 über dem kritischen Wert von 2320. Die Strömungsart wird turbulent sein.

Beispiel 5: Wie Beispiel 3, jedoch mit zwei Doppel-U-Sonde da 25.

Entzugsleist.,  $q_s$ : =  $6 \text{ kW} \cdot (1-1/4) = 4,5 \text{ kW}$   
 Sondenlänge,  $l_s$ : =  $4,5 \text{ kW} / 45 \text{ W/m} = 100 \text{ m}$   
 Wärmekapaz.  $C$ : aus Stoffwerten:  $3,8 \text{ kJ/kgK}$   
 Dichte,  $\rho$ : aus Stoffwerten:  $1.045 \text{ kg/m}^3$   
 Temp. Diff.  $\Delta T$ :  $2,5\text{K}$   
 Massenstrom,  $m$  =  $q_s/C / \rho/\Delta T = 0,454 \text{ l/s}; 1,63\text{m}^3/\text{h}$   
 m je Sonde =  $0,227 \text{ l/s}; 0,82\text{m}^3/\text{h}$   
 Durchmesser  $d_i$  =  $25 \text{ mm} - 2 \cdot 2,3\text{mm} = 20,4 \text{ mm}$   
 Geschwindigkeit  $w = m/2/\pi \cdot 4/d_i^2 = 0,27 \text{ m/s}$   
 Viskosität  $v$ : aus Stoffwerten:  $4 \text{ mm}^2/\text{s}$

Reynold-Zahl  $Re = 1390$

Die Reynold-Zahl liegt im Beispiel 5 erheblich unter dem kritischen Wert von 2320. Die Strömungsart wird laminar sein.

Beispiel 6: Wie Beispiel 1, jedoch mit einer Doppel-U-Sonde da 40.

Entzugsleist.,  $q_s$ : =  $6 \text{ kW} \cdot (1-1/4) = 4,5 \text{ kW}$   
 Sondenlänge,  $l_s$ : =  $4,5 \text{ kW} / 45 \text{ W/m} = 100 \text{ m}$   
 Wärmekapaz.  $C$ : aus Stoffwerten:  $3,8 \text{ kJ/kgK}$   
 Dichte,  $\rho$ : aus Stoffwerten:  $1.045 \text{ kg/m}^3$   
 Temp. Diff.  $\Delta T$ :  $3 \text{ K}$   
 Massenstrom,  $m$  =  $q_s/C / \rho/\Delta T = 0,378 \text{ l/s}; 1,36\text{m}^3/\text{h}$   
 m je Sonde =  $0,227 \text{ l/s}; 0,82\text{m}^3/\text{h}$   
 Durchmesser  $d_i$  =  $40 \text{ mm} - 2 \cdot 3,7\text{mm} = 32,6 \text{ mm}$   
 Geschwindigkeit  $w = m/\pi \cdot 4/d_i^2 = 0,452 \text{ m/s}$   
 Viskosität  $v$ : aus Stoffwerten:  $4 \text{ mm}^2/\text{s}$

Reynold-Zahl  $Re = 3684$

Die Reynold-Zahl liegt im Beispiel 6 über dem kritischen Wert von 2320. Die Strömungsart wird turbulent sein.

An den vorhergehenden Beispielen erkennt man, dass der Einfluss der Sondenbauart sich erheblich auf die Strömungsart auswirkt. Die üblicherweise vorgesehene Doppel-U-Sonde da 32 ist im Auslegungsfall kritisch. In der Regel wird sich kein Massenstrom mit einem  $\Delta T$  von 2,5 K einstellen lassen. Wird der Massenstrom auf zwei Sonden aufgeteilt liegt die Strömung beim Einsatz einer Sonde Doppel-U 32 in jedem Fall im laminaren Bereich. Die in diesem Fall erfolgreichste U-Sonde stellt die Einfach-U-Sonde da 40 dar.

Die Auslegungsparameter sollten daher im Auslegungsfall bewertet werden und die im jeweiligen Fall strömungsgünstige Sonde gewählt werden.

### 3.2 Koaxialsonden





Koaxialsonden unterscheiden sich gegenüber U-Sonden in ihrer Strömungscharakteristik. Bei der U-Sonde ist der hydraulische Durchmesser dem Rohrlinnendurchmesser gleich zu setzen. Bei Koaxialsonden stellt die Spaltbreite zwischen dem Innenrohr und dem Außenrohr den hydraulischen Durchmesser dar. Das Spaltmaß einer Koaxialsonde mit einem Außenrohr da 63 und einem Innenrohr da 40 beträgt 5,7 mm. Im allgemeinen Betrieb einer Koaxialsonde als Erdwärmesonde wird eine laminare Strömung im Außenring vorherrschen. Durch die geringe Spaltbreite werden die Nachteile bei der Wärmeübertragung bei einer laminare Strömung durch Wärmeleitung im Fluid aufgehoben. Die Wärmeaufnahme verändert sich bei einer Koaxialsonde im laminaren Bereich nur geringfügig. Somit können Koaxialsonden auch in großen Erdwärmesondenfeldern problemlos im Teillastbereich gefahren werden.

### 3.3 Einsatzbereiche Erdwärmesonden

Erdwärmesonden sind individuell auf das jeweilige Projekt hydraulisch aus zu legen. An Hand der vorgestellten Berechnungsmethoden können Erdwärmesonden hinsichtlich ihrer Strömungsart, turbulent oder laminar, untersucht und bewertet werden. Eine Auswahlhilfe, zur hydraulischen Bewertung von Erdwärmesonden stellt nachfolgendes Diagramm. In diesem Diagramm wurden die wesentlichen Parameter zur hydraulischen Bewertung aufgenommen, ideale Einsatzbereiche grün, kritische Bereiche gelb und nicht einsetzbare Bereiche rot dargestellt.

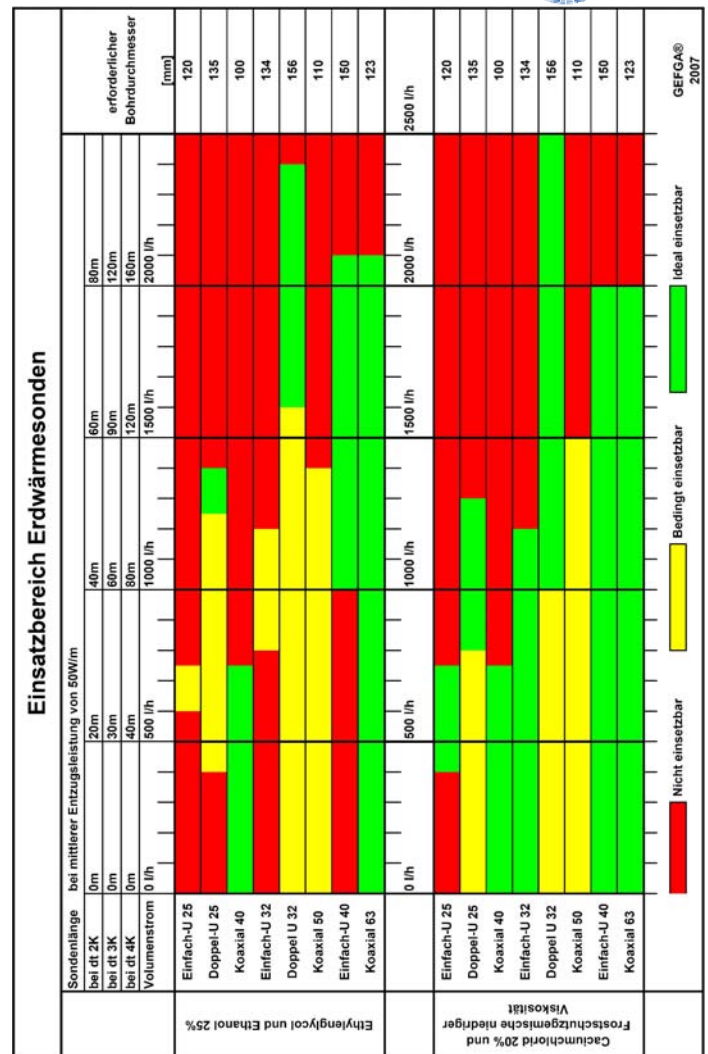


Bild 5: Diagramm Einsatzbereiche Erdwärmesonden

### Literatur

VDI6040 BLATT 2 (2001): Thermische Nutzung des Untergrundes Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen

PRO KÜHLSOLE (2007): GLYKOSOL N DATENBLATT

