



Joachim Tillich (Autor)

**Entwicklung und Anwendung von Gradienten-NMR  
Methoden zum Studium von Transport und Struktur  
in porösen Systemen**

Joachim Tillich

---

**Entwicklung und Anwendung von  
Gradienten-NMR-Methoden zum Studium  
von Transport und Struktur  
in porösen Systemen**

---



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/3193>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Transportprozesse . . . . .	5
2.1.1	Statistische Bewegung . . . . .	5
2.1.2	Selbstdiffusion und mittlerer Propagator . . . . .	6
2.1.3	Strömung . . . . .	7
2.2	Charakterisierung ungeordneter poröser Systeme . . . . .	10
2.2.1	Porosität $\phi$ . . . . .	10
2.2.2	Porengrößenverteilung . . . . .	11
2.2.3	Fraktale Dimension $d_f$ . . . . .	12
2.2.4	Oberfläche-zu-Porenvolumenverhältnis $S/V_p$ . . . . .	14
2.2.5	Tortuosität $\mathfrak{T}$ . . . . .	15
2.3	Transport in porösen Systemen . . . . .	17
2.3.1	Gesetz von Darcy . . . . .	18
2.3.2	Dispersion . . . . .	19
2.4	Grundlagen der NMR-Methoden . . . . .	20
2.4.1	Einführung . . . . .	20
2.4.2	Kernmagnetische Relaxation und Bloch-Gleichungen . . . . .	22
2.4.3	Freier Induktionsabfall . . . . .	23
2.4.4	NMR-Impulssequenzen . . . . .	24
2.4.4.1	Das Spin-Echo (SE) . . . . .	24
2.4.4.2	Die Wirkung magnetischer Feldgradienten . . . . .	25
2.4.4.3	SE mit Gradientenimpulsen (PGSE) . . . . .	27
2.4.4.4	STE mit Gradientenimpulsen (PGSTE) . . . . .	31
2.4.4.5	Interne magnetische Feldgradienten . . . . .	33
2.4.4.6	APGSTE-Sequenz . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Experimentelles</b>	<b>37</b>
3.1	Apparatives . . . . .	37
3.1.1	300 MHz-System mit Kryomagnet . . . . .	37
3.1.2	25,3 MHz-System mit Permanentmagnet . . . . .	40
3.1.3	Der 200 MHz NMR-Tomograph . . . . .	41
3.1.4	Probenzelle und Pumpe . . . . .	41

3.2	Verwendete Materialien . . . . .	44
3.2.1	Sandsteine . . . . .	44
3.2.2	Glaskugeln . . . . .	44
3.2.3	Sephadex . . . . .	45
3.2.4	Flüssigkeiten und Chemikalien . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>47</b>
4.1	Strukturcharakterisierung durch Selbstdiffusionsmessungen . . . . .	47
4.1.1	Selbstdiffusion unter geometrischer Beschränkung . . . . .	47
4.1.1.1	Selbstdiffusion bei kurzen Beobachtungszeiten . . . . .	49
4.1.1.2	Selbstdiffusion bei langen Beobachtungszeiten . . . . .	50
4.1.1.3	Die Padé-Approximation . . . . .	51
4.1.2	Charakterisierung von Sandsteinen . . . . .	53
4.1.2.1	Präparation der Sandsteinproben . . . . .	53
4.1.2.2	Experimentelle Besonderheiten . . . . .	54
4.1.2.3	Ergebnisse der Sandsteinproben aus Brandenburg . . . . .	56
4.1.2.4	Ergebnisse der Sandsteinproben aus Allermöhe . . . . .	79
4.1.2.5	Résumé . . . . .	87
4.1.3	Kombination zeitabhängiger Selbstdiffusionsmessungen mit MRI („dynamic imaging“) . . . . .	90
4.1.3.1	Die NMR-Bildgebungssequenz . . . . .	90
4.1.3.2	Verwendete Modellschüttung . . . . .	92
4.1.3.3	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	95
4.1.3.4	Résumé . . . . .	103
4.2	Strukturcharakterisierung durch Strömungsmessungen . . . . .	104
4.2.1	Strömungsmessungen im Leerrohr . . . . .	104
4.2.1.1	Prinzip der Messung von Strömungsgeschwindig- keiten mit NMR . . . . .	104
4.2.1.2	Pfropfströmung im Leerrohr . . . . .	106
4.2.1.3	Laminare Strömung im Leerrohr . . . . .	107
4.2.2	q-Space-Imaging und Flow-Diffraction . . . . .	114
4.2.2.1	Strömung durch ein poröses Medium . . . . .	114
4.2.2.2	Ergebnisse in Glaskugelschüttungen . . . . .	116
4.2.2.3	Ergebnisse in Sephadex LH 20 . . . . .	120
4.2.2.4	Résumé . . . . .	123

4.2.3	Beobachtungszeitabhängige Strömungsmessungen in Kugelschüttungen . . . . .	124
4.2.3.1	Die Auswirkungen von Fluktuationen im Geschwin- digkeitsfeld auf das NMR-Signal . . . . .	124
4.2.3.2	Ergebnisse . . . . .	126
4.2.3.3	Résumé . . . . .	130
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>133</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>137</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>145</b>
7.1	Meßdaten in tabellarischer Form . . . . .	145
7.1.1	Sandsteine Brandenburg . . . . .	145
7.1.2	Sandsteine Allermöhe . . . . .	148
7.1.3	Kombination „dynamic imaging“ mit MRI . . . . .	149
7.1.4	Strömungsmessungen im Leerrohr . . . . .	150
7.1.5	Strömungsmessungen in porösen Medien . . . . .	152
7.1.6	beobachtungszeitabhängige Strömungsmessungen . . . . .	155
7.2	Symbole . . . . .	157
7.3	Publikationsliste . . . . .	163