

Anwendungen der NMR-MOUSE in Materialforschung, Prozesstechnik und Medizin

Von der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Naturwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

DIPLOM - CHEMIKER

MIRKO KRÜGER

aus Stolberg

Berichter: Universitätsprofessor Dr. Dr. h.c. (RO) Bernhard Blümich
Universitätsprofessor Dr. Marcel Liauw

Tag der mündlichen Prüfung: 04. Juli 2006

*Diese Dissertation ist auf den Internetseiten
der Hochschulbibliothek online verfügbar.*

Berichte aus der Chemie

Mirko Krüger

**Anwendungen der NMR-MOUSE in Prozesstechnik,
Materialforschung und Medizin**

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5421-8

ISBN-13: 978-3-8322-5421-6

ISSN 0945-070X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit von September 2002 bis April 2006 am Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen angefertigt. Herrn Prof. Dr. B. Blümich danke ich für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung dieser Promotionsarbeit. Für die freundliche Übernahme des Korreferats danke ich Prof. Dr. M. Liauw.

*Fantasie ist besser als Wissen,
denn Wissen ist begrenzt.*

Albert Einstein

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen	III
Einleitung	1
1 Theorie	5
1.1 Grundlagen der NMR	5
1.1.1 Einführung in die NMR	5
1.1.2 Transversale Relaxationszeit	6
1.1.3 Experimentelle Bestimmung der transversalen Relaxationszeit	7
1.2 NMR-Bildgebung	10
1.2.1 Prinzipien der Ortskodierung	11
1.2.2 Der \vec{k} -Raum	11
1.2.3 Frequenzkodierung	13
1.2.4 Phasenkodierung	14
1.2.5 Ortsauflösung und FOV (<i>Field of View</i>)	14
1.2.6 SPI (<i>Single Point Imaging</i>)	16
1.3 Diffusion in Feststoffen und Schüttungen	17
1.4 Viskoelastisches Verhalten von Elastomeren	18
1.4.1 Allgemeines	18
1.4.2 Der Elastizitätsmodul	20
2 Experimentelle Ausrüstungen	23
2.1 Hochfeldspektrometer	23
2.2 Niederfeldspektrometer	24
3 Relaxation von Elastomeren	27
3.1 Einleitung und Motivation	27
3.2 Ergebnisse	28

3.3	Zusammenfassung und Ausblick	36
4	NMR-Untersuchungen an Silikon-Brustimplantaten	39
4.1	Allgemeines zu Brustimplantaten	39
4.1.1	Geschichte und Entwicklung	39
4.1.2	Indikationen für Brustimplantate	40
4.1.3	Arten von Brustimplantaten	41
4.1.4	Risiken	41
4.2	Motivation	42
4.3	Untersuchung von Silikonbrustimplantaten mit der NMR-MOUSE	44
4.3.1	Probenpräparation	44
4.3.2	Durchführung der Messungen	45
4.3.3	Ergebnisse und Zusammenfassung	46
5	Trocknung von Granulaten und Einzelkörpern	61
5.1	Einleitung und Motivation	61
5.2	Messungen an Hochfeldspektrometern	62
5.2.1	Trocknung von Einzelkörpern	63
5.2.2	Trocknung von Schüttungen	75
5.3	Messungen mit der NMR-MOUSE	80
6	NMR-Untersuchungen an menschlicher Haut <i>in vivo</i>	87
6.1	Einleitung und Motivation	87
6.2	Verbrennungsstadien	88
6.3	Therapiemöglichkeiten	89
6.4	Narbenklassifikation	90
6.5	Beschreibung des Projektes	92
6.6	Ergebnisse der Hautmessungen	92
6.7	Zusammenfassung und Ausblick	102
7	Zusammenfassung der Ergebnisse	105
	Literaturverzeichnis	109

Symbole und Abkürzungen

C	Betrag
\hat{C}	Tensor
\vec{C}	Vektor
A	Amplitude des NMR-Messsignals
\vec{B}_0, B_0	statisches Magnetfeld (Vektor, Betrag)
\vec{B}_1, B_1	Hochfrequenzfeld (Vektor, Betrag)
BMBF	B undes m inisterium für B ildung und F orschung
CPMG	Pulssequenz von C arr- P urcell- M eiboom- G ill
D_{eff}	effektiver Diffusionskoeffizient
ε	Dehnung
E, E-modul	Elastizitätsmodul
E_{eff}	effektiver Elastizitätsmodul
EPDM	E thylen- P ropylen- D ien- M onomer
F	Kraft
FDA	F ood and D rug A dministration
FID	freier Induktionszerfall (F ree I nduction D ecay)
FOV	experimentelles Sichtfenster (F ield O f V iew)
FT	Fourier-Transformation
\vec{G}, G, G_z	Magnetfeldgradient (Vektor, Betrag, Komponente in z -Richtung)
\hbar	Plancksche Wirkungsquantum
HF	H ochfrequenz
\vec{I}, I	Eigendrehimpuls (Vektor, zugehörige Quantenzahl)
Int	Integral
k_B	Boltzmann-Konstante ($1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$)
K_x	Umrechnungsfaktor
LKS	L abor k oordinatensystem

m	magnetische Quantenzahl
$m_{\text{H}_2\text{O}}$	Menge Wasser in g
\vec{M}_0, M_0	makroskopische Magnetisierung (Vektor, Betrag)
M_z	Magnetisierung in z -Richtung
$M_{x,y}$	transversale Magnetisierung
MRI	bildgebende magnetische Resonanz (M agnetic R esonance I magining)
fmRI	funktionelle bildgebende magnetische Resonanz (f unctional M agnetic R esonance I magining)
nc-MRI	n euronal c urrent- M agnetic R esonance I magining)
MOUSE	M obile U niversal S urface E xplorer
MRT	M agnet R esonanz T omografie
NMR	Kernspinresonanz (N uclear M agnetic R esonance)
NR	Naturkautschuk (N atural R ubber)
PDMS	P oly d imethyl d isiloxan
PEEK	P oly- E thoxy- E thylene- K unststoff
PET	P olyethylenterephthalat
POSS	P atient and O bserver S car S cale
$\rho(\vec{r})$	Spindichte
$\rho_{tr.s.}$	Dichte der trockenen Substanz
RKS	rotierendes K oordinatensystem
σ	Spannung
S	relaxationsgewichtete Gesamtamplitude
S/N	Signal-zu-Rausch-Verhältnis (S ignal-to- N oise-ratio)
SPI	S ingle P oint I magining
T	absolute Temperatur
T_1	Spin-Gitter-Relaxationszeit
T_2	Spin-Spin-Relaxationszeit
T_{2D}	dipolare transversale Relaxationszeit
$T_{2\text{eff}}$	effektive transversale Relaxationszeit
$T_{2\text{Meff}}$	mittlere effektive transversale Relaxationszeit
t_E	Echozeit
TGA	T hermogravimetrische A nalyse
tr.S.	trockene Substanz
$\vec{\mu}$	magnetisches Dipolmoment
ω_0	Larmorfrequenz

VSS	Vancouver Scar Scale
X(i,t)	Feuchtebeladung
γ	gyromagnetisches Verhältnis ($2,675 \cdot 10^8 \text{ T}^{-1}\text{s}^{-1}$ für ^1H)