

Tabellenverzeichnis

2.1. Druckverbreiterung der D1-Linien von Rubidium und Caesium.	12
4.1. Ergebnisse der Faradymessungen durchgeführt an der Universität Erlangen	50
4.2. Abhängigkeit des Produktes $\tau \cdot U_{\alpha=90^\circ}$ bei Variation von τ	54
4.3. Vergleiche von Polarisationsverlusten bei mehreren Pumpzyklen	59
4.4. Vergleich der Verhältnisse von ^{129}Xe -Polarisation zu absorbiertes Laserleistung	61
5.1. Chemische Verschiebung von ^{129}Xe , in verschiedenen biologischen Substanzen	92
A.1. Werte des LANDESchen g-Faktors	109
A.2. Werte des K - und M -Faktors in der Hyperfeinaufspaltung	110
A.3. Werte für den g_F -Faktor in der ZEEMAN-Aufspaltung der Hyperfeinstruktur	110
A.4. Datensammlung von Alkalimetalle	112
A.5. Wichtige Daten der Isotope ^{129}Xe , ^3He und ^1H	113
A.6. Die wichtigsten Austausch-Raten einer optisch gepumpten Spinaustausch-Quelle	114

Abbildungsverzeichnis

2.1. Energieniveau-Diagramme (D-Linien) der stabilen Rubidium-Isotope	6
2.2. Aufspaltung der Hyperfeinstruktur-Niveaus des $^2S_{1/2}$ -Grundniveaus von ^{87}Rb	7
2.3. ZEEMAN-Linien des D1 Überganges in Alkalimetall-Atomen	8
2.4. Drehimpuls-Betrachtungen für die Emission eines σ^+ -Photons	9
2.5. Vereinfachtes Pulsschema einer Gradienten-Echo-Sequenz.	16
2.6. Vereinfachtes Pulsschema einer 2D-CSI-Sequenz.	18
2.7. Schaltungssymbol und Kennlinie eines stark bedämpften JOSEPHSON-Kontakts	19
2.8. Ersatzschaltbild, $\langle U \rangle - I$ -Kennlinie und $\langle U \rangle - \Phi_a$ -Kennlinie eines dc-SQUIDS	20
3.1. Pumpschema für σ^+ -Anregung bei einem Alkalimetall-Atom	25
3.2. Spinaustausch-Stöße durch VAN DER WAALS Molekülbildung oder binäre Stöße	27
3.3. Schema der Raten bei Spinaustausch-Stößen	30
3.4. Phasendiagramm $\text{Rb/Rb}_2\text{O}$	32
3.5. Termschema der ersten angeregten Zustände von Xenon	34
3.6. Hyperfein-Niveaus der angeregten Zustände $6s[3/2]_2$ und $6p[5/2]_3$ von ^{129}Xe	35
3.7. Pumpschema des $6s[3/2]_2 F = 5/2 \rightarrow 6p[5/2]_3 F' = 7/2$ -Überganges von ^{129}Xe	35
4.1. Energieniveau-Schema eines durchstimmbaren „Vierniveau“-Festkörperlasers	38
4.2. Wellenlängenselektion des breitbandigen Ti:Sa-Lasers mittels Lyotfilter	38
4.3. Linienbreite des Ti:Sa-Lasers als Linear-Resonator konfiguriert	39
4.4. Ausgangsleistung des Ti:Sa-Lasers in Abhängigkeit der Wellenlänge	39
4.5. Resonatorschematas des COHERENT 899 Ti:Sa-Lasers	41
4.6. Einfaches Bänderschema eines Halbleiterlasers	42
4.7. Temperaturabhängigkeit der Wellenlänge des Halbleiter-Laserline	43
4.8. Laserlinien zweier Hochleistungs-Halbleiterlaser	44
4.9. Schema einer der beiden Polarisierungseinheiten für das Pumplicht	45
4.10. Messungen der Lichtpolarisation	46
4.11. Messungen und Berechnungen zur Bestimmung der Rb-Polarisation	47
4.12. Verwendetes Messschema am FARADAY-Polarimeter	49
4.13. Aufbau des gepulsten <i>on-line</i> NMR-Experimentes	50
4.14. Kapazitive Anpassung einer Spule an die jeweilige Frequenz Impedanz	51
4.15. Signale der <i>on-line</i> NMR beim Pumpen des σ^+ - und σ^- -Überganges	52
4.16. Schema zur Erklärung des 180° -Phasenversatzes des NMR-Signals	52
4.17. Vergleich von <i>on-line</i> FIDs ohne und mit Zusatz-Shimstrom	53

4.18. Flipwinkel-Kalibration bei der <i>on-line</i> NMR Messung	54
4.19. ^{129}Xe Kernspin-Polarisations-Aufbau- und Relaxations-Zeiten in der Pumpzelle	55
4.20. Temperaturabhängigkeit der ^{129}Xe -Polarisation gemessen mittels <i>on-line</i> NMR	56
4.21. Schema des Aufbaues zum zyklischen Pumpen von ^{129}Xe	57
4.22. Schema des Vakuum-Pumpstandes	58
4.23. ^{129}Xe -Polarisationsvergleich beim optischen Pumpen mittels Ti:Sa- und FAP-Laser	60
4.24. ^{129}Xe -Polarisationsgewinn bei Druckverbreiterung der Rb-Absorptionslinie	60
4.25. Absorptionslinien-Bestimmung beim optischen Pumpen mittels FAP-System	61
4.26. Schema der Durchfluss-Apparatur	63
4.27. Partialdruck-Abhängigkeit der ^{129}Xe -Polarisation	64
4.28. Schema des RF-Resonators zur Erzeugung einer Xenon-Gasentladung	68
4.29. Emissionsmessung der Xenon-Entladung	68
4.30. Schema der Absorptionsmessung an der Xe-Entladungszelle	69
4.31. Absorptionsmessung des breitbandigen Ti:Sa-Lasers am metastabilen Xenon	70
4.32. Leistungsabhängigkeit der Transmission des Ti:Sa-Lasers am metastabilen Xenon	70
4.33. Absorptionsmessung des monomodigen Ti:Sa-Lasers am metastabilen Xenon	71
5.1. Kleine doppelt-resonante (^1H , ^{129}Xe) Oberflächenspule der Firma BRUKER-MEDICAL	74
5.2. Schematische Darstellung der Oberflächenspule zur ^{129}Xe -Lungenbildgebung	74
5.3. Schema eines Differentialübertragers als Ringleitung und Brückenschaltung	75
5.4. Photo der beiden Lungen-Oberflächenspulen und des Differentialübertragers	75
5.5. Schema und Photo der Sende-Empfangs-Kabelspule	76
5.6. Flipwinkel-Kalibration am 3-T-Tomographen	77
5.7. Aufbauzeiten der ^{129}Xe -Polarisation gemessen am 3-T-Tomographen	79
5.8. T_1 -Relaxationsmessungen an Phantomen im 3-T-Tomographen	79
5.9. Schichtselektive Aufnahme einer Glaskugel im 3-T-Tomograph	80
5.10. MR-Bildgebung in einer Schicht senkrecht zu einer ^{129}Xe -Oberflächen-Spule	81
5.11. Auswirkung der B_1 -Feldverteilung einer Oberflächen-Sende-Empfangs-Spule	81
5.12. Einzelschuss-Spektroskopie an hyperpol. ^{129}Xe gelöst in Wasser bzw. Oktanol	82
5.13. Relaxations- und Flipwinkel-Messung von Xenon in Oktanol gelöst	82
5.14. MR-Bildgebung des gelösten Xenon durch selektive Anregung	83
5.15. MR-Bild der Bronchien, aufgenommen mit der kleinen Oberflächenspule	84
5.16. MR-Bildgebung der Lunge mit einer großen Oberflächenspule	85
5.17. NMR-Bildgebung der Lunge mit zwei großen Oberflächenspule	86
5.18. Histogramm von 60 NMR-Spektren aufgenommen über dem Herzen	87
5.19. Zeitverlauf der <i>in vivo</i> Signale bei der NMR-Spektroskopie über dem Herzen	87
5.20. NMR-Spektrum der <i>in vivo</i> Messung gemessen über dem Herzen	88
5.21. NMR-Spektrum gemessen am Hinterkopf mittels der kleinen Oberflächen-Spule	89
5.22. Histogramm der 4×30 NMR-Spektren gemessen am Kopf mittels der Kabel-Spule	89
5.23. Ergebnisse der <i>in vivo</i> Zeitreihen-Spektroskopie am Kopf	90
5.24. Höhenlinien-Diagramme der 1D-CSI Messungen am Kopf und Kugel-Phantom	91
5.25. Mittelung über vier Spektren von der 1D-CSI Messung am Kopf	91

5.26. Schichtselektive 1D-CSI Aufnahmen am Kopf und Kugel-Phantom	92
6.1. Schema der Aufbauten in der magnetisch geschirmten Kabine	94
6.2. Freie Spinpräzession und T_2 -Relaxation der ^{129}Xe Magnetisierung bei 4,67 nT	95
6.3. Lage der Vektoren der präzedierenden ^{129}Xe Magnetisierung	96
6.4. Druckabhängigkeit der Relaxationsrate $1/T_2$ in der magnetisch geschirmten Kabine	99
6.5. Schwebungssignal erzeugt durch zwei Kugeln unter dem SQUID	100
6.6. Zeitverlauf der Signale gemessen mit dem 37-Kanal SQUID-Magnetometer	101
6.7. Rekonstruktion der Magnetfeld-Linien in der Ebene der 37 SQUIDs	102
6.8. T_2 -Relaxation von ^{129}Xe verursacht durch Sauerstoff bei $B_0 = 31$ nT	103
6.9. Signale bei der <i>in vivo</i> Messung	103
6.10. FFTs der <i>in vivo</i> Messung mittels SQUID	104
B.1. Pulsschema der on-line NMR-Steuerung	116
B.2. LabVIEW Programmier-Oberfläche	116
B.3. Bedienoberfläche des Programms zur Steuerung der Durchfluss-Apparatur	117

Literaturverzeichnis

- [Alb94] ALBERT, M. S.; CATES, G. D.; DRIEHUYS, B; HAPPER, W.; SAAN, B.; SPRINGER JR, C. S.; WISHNLA, A.: Biological magnetic resonance imaging using hyperpolarized ^{129}Xe . **In:** *Nature* 370 (1994), S. 199
- [And60] ANDERSON, L. W.; PIPKIN, R. M.; JR., J. C. B.: Hyperfine Structure of Hydrogen, Deuterium and Tritium. **In:** *Phys. Rev.* 120 (1960), S. 1279–1289
- [And92] ANDERSON, L. W.; WALKER, T.: The effect of radiation trapping on a high field spin exchange optical pumped target. **In:** *Nucl. Inst. and Meth. A* 316 (1992), S. 123–127
- [App99] APPELT, S.; ÜNLÜ, T.; ZILLES, K.; SHAH, N. J.; BAER-LANG; M. MALLING: Experimental studies of rubidium absolute polarization at high temperatures. **In:** *Appl. Phys. Lett.* 75 (1999), Nr. 3, S. 427–429
- [Ari77] ARIMONDO, E.; INGUSCIO, M.; VIOLINO, P.: Experimental determination of the hyperfine structure in the alkali atoms. **In:** *Rev. Mod. Phys.* 49 (1977), S. 31
- [Ash89] ASHMAN, J.; ET AL.: **In:** *Nucl. Phys. B* 328 (1989), S. 1
- [Aug98] AUGUSTINE, M. P.; WONG-FOY, A.; YARGER, J. L.; TOMASELLI, M.; PINES, A.; TONT-HAT, D. H.; CLARCE, J.: Low Field magnetic resonance images of polarized noble gases obtained with a dc SQUID. **In:** *Appl. Phys. Lett.* 72 (1998), S. 1908
- [Bar98a] BARANGA, A. B.-A.; APPELT, S.; ERICKSON, C. J.; YOUNG, A. R.; HAPPER, W.: Alkali-metal-atom polarization imaging in high-pressure optical-pumping cells. **In:** *Phys. Rev. A* 58 (1998), Nr. 3, S. 2282–2294
- [Bar98b] BARANGA, A. B.-A.; APPELT, S.; ROMALIS, M. V.; ERICKSON, C. J.; YOUNG, A. R.; CATES, G. D.; HAPPER, W.: Polarization of ^3He by Spin Exchange with Optically Pumped Rb and K Vapors. **In:** *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998), S. 2801–2804
- [Bau97] BAUES, S.: *Vermessung und Optimierung der Homogenität eines 3-Tesla-Ganzkörper-NMR-Tomographen, Überprüfung der Linearität der Gradientenfelder*, Technische Fachhochschule Berlin, Diplomarbeit, 1997
- [Bec95] BECKMANN, M.: *Aufbau eines Faradaypolarimeters zur Messung von Dichte und Polarisation an optisch gepumptem Kalium und Rubidium*, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 1995

- [Ber65] BERNHEIM, R. A.; KORTE, M. W.: Spin Relaxation of Optically Oriented Potassium Vapor. **In:** *J. Chem. Phys.* 42 (1965), S. 2721–2724
- [Ber79] BERNABEU, E.; ALVAREZ, J. M.: Interatomic potentials in cesium-gas systems. Shift and broadening of Hyperfine Components. **In:** *Eleventh Annual Conference of the European Group for Atomic Spectroscopy*, 1979, S. 43
- [Bha80a] BHASKAR, N. D.; HOU, M.; LIGARE, M.; SULEMAN, B.; HAPPER, W.: Role of Na-Xe molecules in spin relaxation of optically pumped Na in Xe gas. **In:** *Phys. Rev. A* 22 (1980), S. 2710
- [Bha80b] BHASKAR, N. D.; PIETRAS, J.; CAMPARO, J.; HAPPER, W.; LIRAN, J.: Spin Destruction in Collisions between Cesium Atoms. **In:** *Phys. Rev. Lett.* 44 (1980), S. 930–933
- [Bha82] BHASKAR, N. D.; HAPPER, W.; MCCLELLAN, T.: Efficiency of Spin Exchange between Rb Spins and ^{129}Xe Nuclei in a Gas. **In:** *Phys. Rev. Lett.* 49 (1982), S. 25
- [Bif96] BIFONE, A.; SONG, Y.-Q.; SEYDOUX, R.; TAYLOR, R. E.; GOODSON, B. M.; PIETRASS, T.; BUDINGER, T. F.; NAVON, G.; PINES, A.: NMR of laser-polarized xenon in human blood. **In:** *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 93 (1996), November, S. 12932–12936
- [Bla01] BLACKWELL, Jim; KARGATIS, V.; SHAYA, E.; THOMAS, B.: <http://adc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/viewer>. **In:** *Internet-Seite des Astronomical Data Center* (2001)
- [Blo74] BLOOM, A. L.: Modes of a laser resonator containing tilted birefringent plates. **In:** *J. Opt. Soc. Am.* 64 (1974), S. 447
- [Boe63] BOER, J. H. D.: *The Dynamical Character of Adsorption*. Oxford U. P., New York, 1963
- [Bou66] BOUCHIAT, M. A.; BROSSEL, J.: Relaxation of Optically Pumped Rb Atoms in Paraffin-Coated Walls. **In:** *Phys. Rev.* 147 (1966), Juli, Nr. 1, S. 41–54
- [Bou69] BOUCHIAT, C. C.; BOUCHIAT, M. A.; POTTIER, L. C. L.: Evidence for Rb-Rare-Gase Molecules from the Relaxation of Polarized Rb Atoms in a Rare Gas. Theory. **In:** *Phys. Rev.* 181 (1969), S. 144–165
- [Bou72] BOUCHIAT, M. A.; BROSSEL, J.; POTTIER, C. L.: Evidence for Rb-Rare-Gase Molecules from the Relaxation of Polarized Rb Atoms in a Rare Gas. Experimental Results. **In:** *J. Chem. Phys.* 56 (1972), S. 3703–3714
- [Bre31] BREIT, G.; RABI, I. I.: Measurement of Nuclear Spin. **In:** *Phys. Rev.* 38 (1931), S. 2082
- [Bro52] BROSSEL, J.; KASTLER, A.; WINTER, J.: **In:** *J. Phys. Radium* 13 (1952), S. 668
- [Car63] CARVER, T. R.: Optical Pumping. **In:** *SCIENCE* 141 (1963), S. 599–608
- [Cat88a] CATES, G. D.; SHAEFER, S. R.; HAPPER, W.: Relaxation of spins due to field inhomogeneities in gaseous samples at low magnetic fields and low pressure. **In:** *Phys. Rev. A* 37 (1988), S. 2877–2885

- [Cat88b] CATES, G. D.; WHITE, D. J.; CHIEN, T.-C.; SCHAEFER, S. R.; HAPPER, W.: Spin Relaxation in gases due to inhomogeneous static and oscillating magnetic fields. **In:** *Phys. Rev. A* 38 (1988), S. 5092–5106
- [Cat90] CATES, G. D.; BENTON, D. R.; GATZKE, M.; HAPPER, W.; HASSON, K. C.; NEWBURY, N. R.: Laser Production of Large Nuclear-Spin Polarization in Frozen Xenon. **In:** *Phys. Rev. Lett.* 65 (1990), S. 2591–2594
- [Cat92] CATES, G. D.; FITZGERALD, R. J.; BARTON, A. S.; BOGORAD, P.; GATZKE, M.; NEWBURY, N. R.; SAAM, B.: Rb-¹²⁹Xe spin-exchange rates due to binary and three-body collisions at high Xe pressures. **In:** *Phys. Rev. A* 45 (1992), S. 4631–4639
- [Cat97] CATES, G. D.; DRIEHUYS, B.; HAPPER, W.; MIDDLETON, H.; MIRON, E.; SAAM, B.; WALTER, D.: High volume hyperpolarizer for spin-polarized noble gas / United States Patent. 1997 (5,642,625). – Forschungsbericht
- [Che57] CHEN, Shang-Yi; TAKEO, Makoto: Broadening and Shift of Spectral Lines Due to the Presence of Foreign Gases. **In:** *Rev. Mod. Phys.* 29 (1957), S. 20
- [Che98] CHEN, X. J.; CHAWLA, M. S.; HEDLUND, L. W.; MÖLLER, H. E.; MACFAL, J. R.; JOHNSON, G. A.: MR Microscopy of Lung Airways with Hyperpolarized 3-He. **In:** *Mag. Res. in Med.* 39 (1998), S. 79–84
- [Chu87] CHUPP, T. E.; WAGSHUL, M. E.; COULTER, K.P.; McDONALD, A. B.; HAPPER, W.: Polarized, high-density, gaseous ³He targets. **In:** *Phys. Rev. C* 36 (1987), S. 2244–2251
- [Chu99] CHUPP, T. E.; COULTER, K. P.; ROSEN, M. S.; SWANSON, S. D.: Chemical shift imaging of laser-polarized ¹²⁹Xe magnetization in rats in vivo. **In:** *Eur. Radiol.* 9 (1999), S. B45. – gezeigt auf dem Int. workshop Les Houches, June 21.25, 1999
- [Col63] COLEGROVE, F. D.; SCHEARER, L. D.; WALTERS, G. K.: Polarization of ³He Gas by Optical Pumping. **In:** *Phys. Rev.* 132 (1963), S. 2561–2572
- [Cou01] COURTADE, E.; NACHER, P.-J.; DEDONDER, C.; JOUVET, C.; DOHNALIK, T.: Enhancement of the ³He ($a^3\Sigma_u^+$) molecular state population by selective excitation of the 2³P atomic state. **In:** ROTTKE, H. (Hrsg.); EICHMANN, U. (Hrsg.); SANDNER, W. (Hrsg.): *The Seventh European Conference on Atomic and Molecular Physics* Bd. 25B. Physik-Verlag, 2001, S. 77
- [CT66] COHEN-TANNOUJDI, C.; KASTLER, A.: Optical Pumping. **In:** *Progress in Optics* Bd. 5. North Holland Publ. Comp., 1966, S. 1–81
- [CT69] COHEN-TANNOUJDI, C.; DUPONT-ROC; HAROCHE; LALOE: Detection of the static magnetic field produced by the oriented nuclei of optically pumped ³He gas. **In:** *Phys. Rev. Lett.* 22 (1969), S. 758
- [Cum95] CUMMINGS, W. J.; HÄUSSER, O.; LORENZON, W.: Optical pumping of Rb vapor using high-power Ga(1-x)Al(x)As diode laser arrays. **In:** *Phys. Rev. A* 51 (1995), S. 4842

- [Deh91] DEHMELT, H. G.: Experiments with an Isolated Subatomic Particle at Rest. **In:** *Physica Scripta* T34 (1991), S. 47–51
- [Dem93a] DEMTRÖDER, W.: *Laserspektroskopie*. Bd. Dritte Auflage. Springer Verlag, 1993, S. 60 f
- [Dem93b] DEMTRÖDER, W.: *Laserspektroskopie*. Bd. Dritte Auflage. Springer Verlag, 1993, S. 85–95
- [Dri95] DRIEHUYS, B.; CATES, G. D.; HAPPER, W.: Surface Relaxation Mechanisms of Laser-Polarized ^{129}Xe . **In:** *Phys. Rev. Lett.* 74 (1995), Juni, Nr. 24, S. 4943–4946
- [Dri96] DRIEHUYS, B.; CATES, G. D.; MIRON, E.; SAUER, K.; WALTER, D. K.; HAPPER, W.: High-volume production of laser-polarized ^{129}Xe . **In:** *Appl. Phys. Lett.* 69 (1996), S. 1668–1670
- [Dru91] DRUNG, D.; ET AL.: **In:** *Clin. Phys. Physiol. Meas.* 12 (1991), Nr. Suppl. B, S. 21
- [Duh00] DUHAMEL, G.; ET AL.: In vivo ^{129}Xe NMR in rat brain during intra-arterial injection of hyperpolarized ^{129}Xe dissolved in a lipid emulsion. **In:** *C. R. Acad. Sci. III* 323 (2000), S. 529–536
- [Dul91] DULICK, M.; D. R. SWENSON, D. T.; YORK, R. L.; CORNELIUS, W. D.; VAN DYKE, O.: Faraday rotation in an alkali-metal vapor and its use to measure vapor thickness and polarization / Los Alamos National Laboratory. 1991 (NM 87545). – MS H838
- [Ern82] ERNÉ, S. N.; ET AL.: *Biomagnetism*. de Gruyter, Berlin, 1982, S. 79
- [Fit99] FITZGERALD, R. J.; GATZKE, M.; FOX, D. C.; CATES, G. D.; HAPPER, W.: ^{129}Xe spin relaxation in frozen xenon. **In:** *Phys. Rev. B* 59 (1999), S. 8795–8811
- [Fra59] FRANZEN, W.: Spin Relaxation of Optically Aligned Rubidium Vapor. **In:** *Phys. Rev.* 115 (1959), S. 850–856
- [Fra74] FRANZ, F. A.; SOORIAMOORTHY, C. E.: Spin relaxation within the P(1/2) and S(1/2) states of cesium measured by white-light optical pumping. **In:** *Phys. Rev. A* 10 (1974), S. 126
- [Fra76] FRANZ, F. A.; VOLK, C.: Spin relaxation of rubidium atoms in sudden and quasimolecular collisions with light-noble-gas atoms. **In:** *Phys. Rev. A* 14 (1976), S. 1711–1728
- [Fre93] FREER, H.: *Hochfrequenzangeregte Entladungslampen für Nd:YAG-Laser*, Universität Hannover, Doktorarbeit, 1993
- [Gam65] GAMBLIN, R. L.; CARVER, T. R.: Polarization and Relaxation Processes in ^3He Gas. **In:** *Phys. Rev.* 138 (1965), S. 946–960
- [Gat93] GATZKE, M.; CATES, G. D.; DRIEHUYS, B.; FOX, D.; HAPPER, W.; SAAM, B.: Extraordinarily Slow Nuclear Spin Relaxation in Frozen Laser-Polarized ^{129}Xe . **In:** *Phys. Rev. Lett.* 70 (1993), S. 690–693

- [Gud91] GUDOSHNIKOOV, S. A.; KOZLOV, A. N.; MASLENNIKOV, Y. V.; SEREBRJAKOV, A. Y.; SNIGIREV, O. V.: Direct measurements of the magnetic field induced by optically polarized ^3He atoms. **In:** *IEEE* 27 (1991), S. 2449
- [Hak90] HAKEN, H.; WOLF, H. C.: *Atom- und Quantenphysik*. Bd. 4. erw. Auflage. Springer-Verlag, 1990
- [Han24] HANLE, W.: Über magnetische Beeinflussung der Polarisation der Resonanzfluoreszenz. **In:** *Z. d. Phys.* 30 (1924), S. 93–105
- [Hap72] HAPPER, W.: Optical Pumping. **In:** *Rev. Mod. Phys.* 44 (1972), S. 169–249
- [Hap84] HAPPER, W.; MIRON, E.; SCHAEFER, S.; SCHREIBER, D.; VAN WIJNGAARDEN, W. A.; ZENG, X.: Polarization of the nuclear spins of noble-gas atoms by spin exchange with optically pumped alkali-metal atoms. **In:** *Phys. Rev. A* 29 (1984), S. 3092–3110
- [Has99] HASSON, K. C.; CELLA, P.; DEATON, D.; KAMEYA, G.; DRIEHUYS, B.: Continuous-Flow Production of Polarized ^{129}Xe . **In:** *Eur. Radiol.* 9 (1999), S. B10. – Int. workshop Les Houches, June 21.25, 1999
- [Haw53] HAWKINS, W. B.; DICKE, R. H.: The Polarization of Sodium Atoms. **In:** *Phys. Rev.* 91 (1953), S. 1008 f
- [Hec87] HECHT, E.: *Optics*. second edition. Addison-Wesley Publishing Company, 1987
- [Hry70] HRYCYSHYN, E.S.; KRAUSE, L.: Inelastic collisions between excited alkali atoms and molecules. VII. Sensitized fluorescence and quenching in mixtures of Rb with H_2 ; HD; D_2 ; ...; N_2 . **In:** *Can. J. Phys.* 48 (1970), S. 2761–2768
- [Hun63] HUNT, E. R.; CARR, H. Y.: Nuclear Magnetic Resonance of ^{129}Xe in Natural Xe. **In:** *Phys. Rev.* 130 (1963), S. 2302–2305
- [Jac82] JACKSON, J. D.: *Klassische Elektrodynamik*. 2. Auflage. Walter de Gruyter, 1982
- [Jam88] JAMESON, C. J.; JAMESON, A. K.; HWANG, J. K.: Nuclear spin relaxation by intermolecular magnetic dipole coupling in the gas phase. ^{129}Xe in oxygen. **In:** *J. Chem. Phys.* 89 (1988), S. 4074
- [Joh97] JOHNSON, G. A.; ET AL.: Dynamics of Magnetization in Hyperpolarized Gas MRI of the Lung. **In:** *Mag. Res. in Med.* 38 (1997), S. 66–71
- [Jos62] JOSEPHSON, B.: Possible new effects in superconductive tunneling. **In:** *Phys. Lett.* 1 (1962), S. 251–253
- [Kad98] KADLECEK, S.; ANDERSON, L. W.; WALKER, T. G.: Field Dependence of Spin Relaxation in a Dense Rb Vapor. **In:** *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998), S. 5512–5515

- [Kas50] KASTLER, A.: Quelques Suggestions Concernant La Production Optique Et La Détection Optique D'une Inégalité De Population Des Niveaux De Quantification Des Atomes. Application A L'Expérience De Stern Et Gerlach Et A La Résonance Magnétique. **In:** *J. Phys. Radium* 11 (1950), S. 255–265
- [Kau97] KAUCZOR, H.-U.; EBERT, M.; KREITNER, K.-H.; NILGENS, H.; SURKAU, R.; HEIL, W.; HOFMANN, D.; OTTEN, E. W.; THELEN, M.: Imaging of the Lungs using ^3He MRI: Preliminary clinical Experience in 18 Patients with and without Lung diseases. **In:** *J. Mag. Res. Imag.* 7 (1997), Nr. 3, S. 538–543
- [Kil26] KILLIAN, T. J.: Thermionic Phenomena Caused By Vapors Of Rubidium And Potassium. **In:** *Phys. Rev.* 27 (1926), S. 578–587
- [Kil97] KILIAN, W.: *Stabilisierung eines Lasersystems und Untersuchungen zur Optimierung einer Spinaustauschquelle*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen - Nürnberg, Diplomarbeit, 1997
- [Kil99a] KILIAN, W.; GROSENICK, D.; SEIFERT, F.; RINNEBERT, H.: Hyperpolarized Natural Xenon By Spin-Exchange Optical Pumping Using Si:Sapphire And High-Power Diode Lasers. **In:** *Eur. Radiol.* 9 (1999), S. B11. – Int. workshop Les Houches, June 21.25, 1999
- [Kil99b] KILIAN, W.; SEIFERT, F.; GROSENICK, D.; RINNEBERG, H.: Pulsed low field ^{129}Xe NMR for on-line monitoring of hyperpolarized natural Xenon production. **In:** *ESMRMB '99 16th Annual Meeting, Seville* Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine, Elsevier, Vol. 8 Suppl. 1 September 1999, S. 204
- [Kni88] KNIZE, R. J.; WU, Z.; HAPPER, W.: Optical pumping and spin exchange in gas cells. **In:** *Adv. At. & Mol. Phys.* 24 (1988), S. 223–267
- [Koc95] KOCH, N.: *Bau und Optimierung eines Dissoziators für Wasserstoff und Deuterium*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, März 1995
- [Koe96] KOECHNER, W.: *Series in Opt. Sciences*. Bd. 3rd Edition: *Solid-State Laser Engineering*. Springer-Verlag, 1996, S. 140 ff
- [Kop56] KOPFERMANN, H.: *Kernmomente*. Bd. zweite Auflage. Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H., 1956
- [Lar91] LARSON, B.; HÄUSSER, O.; DELHEIJ, P. P. J.; WHITTAL, D. M.; THIESSEN, D.: Optical pumping of Rb in the presence of high-pressure ^3He buffer gas. **In:** *Phys. Rev. A* 44 (1991), S. 3108
- [Lau73] LAUTERBUR, P. C.: Image formation by induced local interactions: examples employing nuclear magnetic resonance. **In:** *Natur* 242 (1973), S. 190–191
- [LB60] LANDOLT-BÖRNSTEIN: *Zahlenwerte und Funktionen aus Physik; Chemie; Astronomie; Geophysik und Technik*. Bd. 6. Auflage, II Band, 2. Teil, Bandteil a. Springer-Verlag, 1960, S. 1 ff

- [LB62] LANDOLT-BÖRNSTEIN: *Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik*. Bd. 6. Auflage, II Band, 2. Teil, Bandteil b. Springer-Verlag, 1962, S. 1 ff
- [Lin45] LINDHOLM, E.: **In:** *Arkiv Mat. Astron. Fys.* 32 A (1945), S. 17
- [LS77] LEFÈVRE-SEGUIN, V.; LEDUC, M.: Metastability-exchange and depolarising collisions in xenon and krypton. **In:** *J. Phys. B* 10 (1977), S. 2157
- [Mat99] MATZ, H.; ET AL.: **In:** *Appl. Superconductivity* 6 (1999), S. 577
- [May85] MAYER; KUCKUK: *Atomphysik*. Teubner, Stuttgart, 1985
- [McG90] MCGREGOR, D. D.: Transverse relaxation of spin-polarized ^3He gas due to a magnetic field gradient. **In:** *Phys. Rev. A* 41 (1990), Nr. 5, S. 2631–2635
- [McN62] MCNEAL, R. J.: Dissorientation Cross Sections in Optical Pumping. **In:** *J. Chem. Phys.* 37 (1962), S. 2726
- [Mit94] MITTER, H.: *Quantentheorie*. BI-Wiss.-Verlag Mannheim, 1994
- [Möl99] MÖLLER, H. E.; CHAWLA, M. S.; CHEN, X. J.; DRIEHUYS, B.; HEDLUND, L. W.; WHEELER, C. T.; JOHNSON, G. A.: Magnetic Resonance Angiography With Hyperpolarized ^{129}Xe Dissolved in a Lipid Emulsion. **In:** *Mag. Res. in Med.* 41 (1999), S. 1058–1064
- [Mug97] MUGLER, J. P.; ET AL.: MR Imaging and Spectroscopy Using Hyperpolarized ^{129}Xe Gas: Preliminary Human Results. **In:** *Mag. Res. in Med.* 37 (1997), S. 809
- [Nac85] NACHER, P. J.; LEDUC, M.: Optical pumping in ^3He with a laser. **In:** *J. Phys.* 46 (1985), S. 2057
- [Nac96] NACHER, P.-J.; PINARD, M.; TASTEVIN, G.: Optical pumping of metastable ^{129}Xe . **In:** *Perspective of MR Imaging using Polarized Gases, International Conference in Les Houches*, 1996
- [Nac99] NACHER, J.-P.: *persönliche Mitteilung*. 21.-25. Juni 1999. – auf der Internationalen Tagung in Les Houches (siehe auch [Kil99a])
- [Nag95] NAGENGAST, W.: *Entwicklung von druckstimbaren externen Resonatoren hoher Stabilität für Halbleiterlaser*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 1995
- [Nag97] NAGENGAST, W.; RITH, K.: High-power single-mode emission from a broad-area semiconductor laser with a pseudoexternal cavity and a Fabry-Perot etalon. **In:** *Opt. Lett.* 22 (1997), S. 1250
- [Nag98] NAGENGAST, W.; NASS, A.; GROSSHAUSER, C.; RITH, K.; SCHMIDT, F.: Relaxation of electron polarization for optically pumped rubidium atoms. **In:** *J. Appl. Phys.* 83 (1998), S. 5626–5621

- [Nag99] NAGENGAST, W.: *Optisches Pumpen und Untersuchung der Relaxation von Alkalimetallgasen mit Halbleiterlasern und Entwicklung von Pump-Halbleiterlaser-Systemen für Spinaustauschquellen*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Doktorarbeit, 1999
- [Nel00] NELSON, I. A.; CHANN; WALKER: Spin-exchange optical pumping using a frequenzynarrowed high power diode laser. **In:** *Appl. Phys. Lett.* 76 (2000), S. 1356
- [Nes63] NESMEYANOV, A. N.; GARY, R.: *Vapor Pressure of the chemical elements*. Elsevier Publishing Company, 1963
- [Neu74] NEUMAN, C. H.: Spin Echo of spins diffusing in a bounded medium. **In:** *J. Chem. Phys.* 60 (1974), S. 4508–4511
- [Nin79] NINIKOSKI, T. O.; RIEUBLAND, J.-M.: Dynamic Nuclear Polarization in Irradiated Ammonia Below 0.5 K. **In:** *Phys. Lett.* 72A (1979), S. 141–144
- [Noe00] NOESKE, Ralph: *Anwendung der Hochfeld-(3-Tesla)-NMR-Tomographie: Abbildung des menschlichen Herzens und NMR-Thermographie an Phantomen für eine Tiefenhypertermie*, Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin, Doktorarbeit, 2000
- [Ott75] OTTINGER, Ch.; ET AL.: Broadening of Rb resonance lines by the noble gases. **In:** *Phys. Rev. A* 11 (1975), S. 1815
- [Ott96] OTTEN, E. W.: Interdisciplinary experiments with polarized noble gases. **In:** HEUVELL, H.B. Van Linden Van D. (Hrsg.); WALRAVEN, J.T.M. (Hrsg.); REYNOLDS, M.W. (Hrsg.): *Fifteenth International Conference on Atomic Physics, Zeeman-Effect Centenary* Bd. 15. World Scientific, 5-9 August 1996, S. 113–131
- [Pur56] PURCELL, E. M.; FIELD, G. B.: Influence of collisions upon population of hyperfine states in hydrogen. **In:** *Astrophys. J.* 124 (1956), S. 542–549
- [Rad85] RADZIG, A. A.; SMIRNOV, B. M.: *Reference Data on Atoms, Molecules and Ions*. Springer-Verlag, 1985
- [Rik97] RIKKEN, G.; SPARENBERG, A.; VAN TIGGELEN, B.: Der Photonen-Hall-Effekt. **In:** *Phys. Bl.* 53 (1997), Nr. 2, S. 133 f
- [Rom97] ROMALIS, M. V.; MIRON; CATES, G. D.: Pressure broadening of Rb D1 and D2 lines by 3He; 4He; N₂; and Xe: Kinereores and near wings. **In:** *Phys. Rev. A* 56 (1997), S. 4569–4578
- [Ros99] ROSEN, M.S.; CHUPP, T. E.; COULTER, K. P.; WELSH, R. C.; SWANSON, S. D.: Polarized ¹²⁹Xe Optical Pumping/Spin Exchange and Delivery System for Magnetic Resonance Spectroscopy and Imaging Studies. **In:** *Rev. Sci. Inst.* 70 (1999), S. 1546–1552
- [Rup00] RUPPERT, K.; BROOKEMAN, J. R.; HAGSPIEL, K. D.; DRIEHUYS, B.; MUGLER, J. P.: NMR of hyperpolarized ¹²⁹Xe in the canine chest: spectral dynamics during a breath-hold. **In:** *NMR Biomed* 13 (2000), Nr. 4, S. 220–228

- [Rut99] RUTH, U.; SCHMIDT, J.; FICK, D.; JÄNSCH, H. J.: Production of nitrogen-free, hyperpolarized ^{129}Xe gas. **In:** *Appl. Phys. B* 68 (1999), S. 93
- [Sak96] SAKAI, K.; ET AL.: Temporal Dynamics of Hyperpolarized ^{129}Xe Resonances in Living Rats. **In:** *J. Mag. Res. B* 111 (1996), S. 300–304
- [Sch65] SCHEARER, L.D.; WALTERS, G.K.: Nuclear Spin-Lattice Relaxation in the Presence of Magnetic-Field Gradients. **In:** *Phys. Rev. A* 139 (1965), S. 1398–1402
- [Sch99] SCHLENGA, K.; MCDERMOTT; CLARKE; SOUZA; WONG-FOY; PINES: Low-field magnetic resonance imaging with a high-Tc dc SQUID. **In:** *Appl. Phys. Lett.* 75 (1999), S. 3695
- [Sey97] SEYFFARTH, T.: *Aufbau eines Meßplatzes zum Nachweis der kernmagnetischen Induktion bei niedrigen Magnetfeldern*, Technische Fachhochschule Berlin, Diplomarbeit, 1997
- [Sim77] SIMON, A.: *Homoatomic Rings, Chains and Macromolecules of Main-Group Elements*. Elsevier, 1977, S. 117–149
- [Sli92] SLICHTER, C. P.: *Principles of Magnetic Resonance*. Bd. 3. Aufl. 2. Druck. Springer Verlag, 1992, S. 213 f
- [Sob79] SOBELMAN, I. I.: *Atomic Spectra and Radiative Transitions*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1979 (Springer Series in Chemical Physics)
- [Ste95] STENGER, J.: *Entwicklung und Aufbau einer lasergepumpte Quelle für polarisierte Wasserstoff- und Deuteriumatomstrahlen*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Doktorarbeit, 1995
- [Ste97] STENGER, J.; BECKMANN, M.; NAGENGAST, W.; RITH, K.: A compact Faraday rotation monitor for density and polarization of optically pumped alkali atoms. **In:** *Nucl. Inst. and Meth. A* 384 (1997), S. 333–336
- [Sto94] STOCK, F., Universität Heidelberg, Doktorarbeit, 1994
- [Sur97] SURKAU, R.; BECKER; EBERT; GROSSMANN; HEIL; HOFMANN; HUMBOLT; LEDUC: Realization of a broad band neutron spin filter with compressed; polarized ^3He gas. **In:** *Nucl. Inst. and Meth. A* 384 (1997), S. 444
- [Swa97] SWANSON, S. D.; ROSEN, M. S.; AGRANOFF, B. W.; COULTER, K. P.; WELSH, R. C.; CHUPP, T. E.: Brain MRI with Laser-polarized ^{129}Xe . **In:** *Mag. Res. in Med.* 38 (1997), S. 695–698
- [Swa99] SWANSON, S. D.; ROSEN, M. S.; COULTER, K. P.; WELSH, R. C.; CHUP, T. E.: Distribution and Dynamics of Laser-Polarized ^{129}Xe Magnetization in vivo. **In:** *Mag. Res. in Med.* 42 (1999), S. 1137–1145
- [Swe88] SWENSON, D. R.; ANDERSON, L. W.: Relaxation rates for optically pumped Na vapor on silicone surfaces. **In:** *Nucl. Inst. and Meth. B* 29 (1988), S. 627–642

- [Tre90] TREMBLAY, P.; ET AL.: Absorption profiles of alkali-metal D lines in the presence of a static magnetic field. **In:** *Phys. Rev. A* 42 (1990), S. 2766
- [Tup86] TUPA, D.; ANDERSON, L. W.; HUBER, D. L.; LAWLER, J. E.: Effect of radiation trapping on the polarization of an optically pumped alkali-metal vapor. **In:** *Phys. Rev. A* 33 (1986), S. 1045–1051
- [Tup87] TUPA, D.; ANDERSON, L. W.: Effect of radiation trapping on the polarization of an optically pumped alkali-metal vapor in a weak magnetic field. **In:** *Phys. Rev. A* 36 (1987), S. 2142–2144
- [Wag94] WAGSHUL, M. E.; CHUPP, T. E.: Laser optical pumping of high-density Rb in polarized ^3He targets. **In:** *Phys. Rev. A* 49 (1994), S. 3854–3869
- [Wal89] WALKER, T. G.: Estimates of spin-exchange parameters for alkali-metal-noble-gas pairs. **In:** *Phys. Rev. A* 40 (1989), S. 4959–4964
- [Wal93a] WALKER, T.; ANDERSON, L. W.: Consequences of Spin-Exchange Collisions for Polarized Hydrogen and Deuterium Targets. **In:** *Phys. Rev. Lett.* 71 (1993), Nr. 14, S. 2346
- [Wal93b] WALKER, T.; ANDERSON, L. W.: Spin-exchange collisions and their consequences for spin-polarized gas targets of hydrogen and deuterium. **In:** *Nucl. Inst. and Meth. A* 334 (1993), S. 313–324
- [Wal97] WALKER, T. G.; HAPPER, W.: Spin-exchange optical pumping of noble-gas nuclei. **In:** *Rev. Mod. Phys.* 69 (1997), S. 629
- [Wal98] WALTER, D. K.; HAPPER, W.; WALKER, T. G.: Estimates of the relative magnitudes of the isotropic magnetic-dipole hyperfine interactions in alkali-metal–noble-gas systems. **In:** *Phys. Rev. A* 58 (1998), S. 3642–3653
- [Wat65] WATTS, H.: Diffusion in Multicomponent Gaseous Mixtures, Part 2: Xe-133 in He, Ne, Ar and Kr. **In:** *Canadian Journal Of Chemistry* 43 (1965), S. 431–435
- [Wei96] WEINSTOCK, H. (Hrsg.): *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1996
- [Wol99] WOLBER, J.; CHERUBIN, A.; DZIK-JURASZ, A. S. K.; LEACH, M. O.; BIFONE, A.: Spin-lattice relaxation of laser-polarized xenon in human blood. **In:** *Proc. Nat. Acad. Sci.* 96 (1999), S. 3664–3669
- [Wu86] WU, Z.; KITANO, M.; HAPPER, W.; HOU, M.; DANIELS, J.: Optical determination of alkali metal vapor number density using Faraday rotation. **In:** *Appl. Opt.* 25 (1986), S. 4483–4492
- [Wu87] WU, Z.; HAPPER, W.: Coherent Nuclear-Spin Interactions of Adsorbed ^{131}Xe Gas with Surfaces. **In:** *Phys. Rev. Lett.* 59 (1987), September, Nr. 13, S. 1480–1483

- [You97] YOUNG, A. R.; ET AL.: Three-dimensional imaging of spin polarization of alkali-metal vapor in optical pumping cells. **In:** *Appl. Phys. Lett.* 70 (1997), S. 3081
- [Zen85] ZENG, X.; WU, Z.; CALL, T.; MIRON, E.; SCHREIBER, D.; HAPPER, W.: Experimental determination of the rate constants for spin exchange between optically pumped K, Rb and Cs atoms and ^{129}Xe nuclei in alkali-metal - noble-gas van der Waals molecules. **In:** *Phys. Rev. A* 31 (1985), S. 260–278
- [Zer00] ZERGER, J. N.; LIM, M. J.; COULTER, K. P.; CHUP, T. E.: Polarization of ^{129}Xe with High Power External-Cavity Laser Diode Arrays. **In:** *Appl. Phys. Lett.* 76 (2000), S. 1798–1800
- [Zor93] ZORY, P. S.: *Quantum Well Lasers*. Academic Press, London, 1993