

Aggregation magnetischer Staubpartikel unter Mikrogravitation und unter variablen Magnetfeldbedingungen

Von der Fakultät für Physik und Geowissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr.rer.nat.)
genehmigte
Dissertation

von Michael Rost
aus Braunschweig

Diese Publikation ist in gedruckter Version verfügbar bei Copernicus GmbH,
ISBN 3-936586-57-8

1. Referentin oder Referent: Professor Dr. Karl-Heinz Glaßmeier
2. Referentin oder Referent: Professor Dr. Jürgen Blum
eingereicht am: 27.02.2006
mündliche Prüfung (Disputation) am: 29.05.2006

Vorabveröffentlichungen

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden mit Genehmigung der Fakultät der Physik und Geowissenschaften, vertreten durch den Mentor der Arbeit, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

Publikationen:

NÜBOLD, H., T. POPPE, M. ROST, K.-H. GLASSMEIER, *Magnetic Aggregation II: Laboratory and Microgravity Experiments*, Icarus 165, 2003, S. 195-214.

Tagungsbeiträge:

ROST, M., H. NÜBOLD, T. POPPE, K.-H. GLASSMEIER, *Hotzenplotz - A parabolic flight experiment on magnetic dust aggregation*, Rosetta Lander Science Meeting, Katlenburg-Lindau, 2001.

ROST, M., H. NÜBOLD, K.-H. GLASSMEIER, *Hotzenplotz - A parabolic flight experiment on magnetic dust aggregation*, Romap Meeting, Graz, 2001.

ROST, M., *ADAM + Hotzenplotz: Two Microgravity Experiments*, Vortrag anlässlich des Seminars der International Max Planck Research School Solar System and Beyond, Katlenburg-Lindau, 2002.

ROST, M., H. NÜBOLD, T. POPPE, C. DOMINIK, AND K.-H. GLASSMEIER, *Alignment of Magnetic Dust Aggregates in Zero-G Experiments*, EGU EGS AGU Joint Assembly, Nizza, 2003.

ROST, M., H. NÜBOLD, T. POPPE, C. DOMINIK, AND K.-H. GLASSMEIER, *Magnetic Dust Aggregation Experiments on Formation of Objects in Early Solar System*, IAU XXV General Assembly, Sydney, 2003.

ROST, M., *Magnetic Dust Aggregation under Zero-g and Low Magnetic Field Conditions*, Vortrag anlässlich des Seminars der International Max Planck Research School Solar System and Beyond, Katlenburg-Lindau, 2004.

ROST, M., T. POPPE AND K.-H. GLASSMEIER, *Aggregation of Micron-sized Magnetic Dust Particles in Low Magnetic Field Conditions*, EGU General Assembly, Wien, 2005.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Liste der verwendeten Formelzeichen und Konstanten	XI
Erläuterungen von verwendeten Begriffen und Abkürzungen	XIII
1 Einleitung	1
2 Planetenentstehung und Staubaggregation	5
2.1 Entstehung von Sternen- und Planetensystemen	5
2.1.1 Sternentstehung - von Gas und Staub zum Stern	5
2.1.2 Entwicklung von protoplanetaren Scheiben	7
2.1.3 Planetenentstehung - vom Staub zum Planeten	9
2.2 Zusammensetzung verschiedener Himmelskörper	12
2.2.1 Zusammensetzung von interstellarem Staub und protoplanetaren Scheiben	12
2.2.2 Zusammensetzung von Kometen, Asteroiden und Meteoriten . . .	13
2.2.3 Zusammensetzung von Planeten	14
2.2.4 Fragmentation und Kristallisation in protoplanetaren Scheiben . .	15
2.3 Magnetfelder im Universum	15
2.3.1 Magnetfelder im interstellaren Raum	16
2.3.2 Magnetfelder in protoplanetaren Scheiben	17
2.3.3 Magnetisierung von Partikeln	17
2.3.4 Polarisierung von Sternenlicht und Ausrichtung interstellarer Par- tikel	19
2.4 Mechanismen der Koagulation und Aggregation	19
2.4.1 Koagulation von Mikrometerpartikeln	20
2.4.2 Fraktales Wachstum	21
2.4.3 Aggregation mit magnetischen Kräften	22
2.4.4 Staubaggregation im Sonnennebel und in protoplanetaren Scheiben	24
2.5 Offene Fragen	25

3	Experimentelle Voraussetzungen für Aggregationsversuche	27
3.1	Vakuum	27
3.2	Mikrogravitation	28
3.2.1	Levitationstrommel	29
3.2.2	Fallturm	29
3.2.3	Höhenforschungsraketen	31
3.2.4	Parabelflug	31
3.2.5	Orbit	33
3.2.6	Fazit	34
3.3	Magnetische Felder und Partikel	36
3.3.1	Magnetische Umgebungsbedingungen	36
3.3.2	Magnetischer Staub	36
4	Aggregationsexperimente und Vorbetrachtungen	39
4.1	Das ADAM-Experiment	39
4.2	Eigenschaften des verwendeten Staubes	40
4.2.1	Eisenpartikel	40
4.2.2	Bariumferritstaub	41
4.2.3	Silikatstaub	43
4.3	Aggregatausrichtung	46
4.3.1	Ankoppelung der Aggregate an das Erdfeld	46
4.3.2	Richtung des Erdfeldes	49
4.4	Der Einfluß externer Magnetfelder auf den Aggregationsprozeß	51
4.4.1	Relaxationszeit	51
4.4.2	Vergleich der wirkenden Drehmomente	54
4.5	Abschätzung störender Felder	57
4.5.1	Das Erdmagnetfeld auf Beispielflugbahnen	57
4.5.2	Störfelder im Parabelflugzeug	58
4.5.3	Vergleich der gemessenen Felder mit modellierten Feldern	60
4.6	Erzeugung und Kompensation von Magnetfeldern	62
4.6.1	Homogenitätsbereiche von Spulensystemen	63
5	Versuchsaufbau und Durchführung der Experimente	65
5.1	Grundkomponenten	65
5.1.1	Das Vakuumsystem	65
5.1.2	Staubdispergierung	68
5.1.3	Optische Geräte	72
5.1.4	Struktur und Montage im Flugzeug	75
5.1.5	Stromversorgung	76
5.2	Versuchsaufbau: Datenaufnahme und Weiterverarbeitung	78
5.2.1	Meßgeräte und Datenaufnahme	78
5.2.2	Videoaufnahme und Weiterverarbeitung	82
5.3	Technische Umsetzung der Magnetfeldmanipulation	82
5.3.1	Das Spulensystem	82
5.3.2	Steuerung des Spulensystems	84
5.3.3	Magnetfeldverlauf im Spulensystem	84

5.4	Aufbau und Durchführung des ADAM+EVE-Experimentes im Flugzeug .	86
5.4.1	Versuchsaufbau im Flugzeug	86
5.4.2	Koordinatensysteme	86
5.4.3	Flugrouten	87
5.4.4	Versuchsdurchführung	88
5.5	Aufbau und Durchführung des CAIN+ABEL-Experimentes im Flugzeug	90
5.5.1	Versuchsaufbau im Flugzeug	90
5.5.2	Koordinatensysteme	90
5.5.3	Flugrouten	91
5.5.4	Versuchsdurchführung	91
6	Auswertung, Ergebnisse und Diskussion	93
6.1	ADAM+EVE-Experiment – ESA PFC 36	93
6.1.1	Beschleunigungsmessung und Separation der Parabeln	93
6.1.2	Kompensation des Magnetfeldes im Versuchsraum	93
6.2	CAIN+ABEL-Experiment – ESA PFC 40	98
6.2.1	Separation der Parabeln	98
6.2.2	Manipulation des Magnetfeldes im Versuchsraum	99
6.3	Ausrichtung der Aggregate unter verschiedenen Feldbedingungen	104
6.4	Größenverteilung der beobachteten Aggregate	109
6.5	Struktur der beobachteten Aggregate	113
6.6	Diskussion der Ergebnisse	119
6.6.1	Magnetfeldmanipulation	119
6.6.2	Aggregateigenschaften	120
7	Zusammenfassung und Ausblick	125
A	Technische Zeichnungen der Komponenten des Versuchsaufbaus	129
B	Elektronische Schaltpläne	131
	Literaturverzeichnis	133
	Danksagung	141
	Curriculum Vitae	143

Abbildungsverzeichnis

2.1	Gas- und Staubebel: Adlernebel und Orionnebel	6
2.2	Sternentstehungsgebiete im Adler- und Orionnebel	7
2.3	Sedimentation zur Zentralebene	8
2.4	Entstehung von Planetensystemen	11
2.5	Temperaturverlauf in protoplanetaren Scheiben	16
3.1	Knudsenzahlen	28
3.2	Funktionsprinzip der Levitationstrommel	30
3.3	Parabelflugzeug	32
3.4	Schematische Darstellung der Parabelbahn	33
3.5	Parabelsequenz	34
3.6	Partikelbeschleunigung während der Mikrogravitationsphase	35
3.7	Hysteresekurve	37
4.1	Größenverteilung der Eisenpartikel	41
4.2	Größenverteilung der Bariumferritpartikel	42
4.3	Größenverteilung der Silikatpartikel	44
4.4	Verwendete Staubsorten	45
4.5	<i>In-situ</i> -Aufnahme einer Schar gewachsener Aggregate	46
4.6	Bestimmung der Ausrichtungswinkel der Aggregate	47
4.7	Ausrichtungswinkel der Aggregate in Abhängigkeit von der Länge	48
4.8	Ausrichtungswinkel der Aggregate in Abhängigkeit von der Zeit	49
4.9	Aggregatausrichtung in Abhängigkeit von der Aggregatmagnetisierung	50
4.10	Relaxationszeit eines Aggregates	52
4.11	Abhängigkeit der Relaxationszeit von der Länge und der Feldstärke	53
4.12	Magnetische Kugel	55
4.13	Vergleich Erdmagnetfeld zum Partikelfeld	56
4.14	Vergleich der wirkenden Drehmomente	56
4.15	Flugrouten der Parabelflüge der SPFC 5	57
4.16	Messungen des Magnetfeldes während eines Parabelfluges	59
4.17	Komponenten des an Bord des Parabelflugzeugs gemessenen Magnetfeldes	61
4.18	Vergleich der Magnetfeldmessungen mit theoretischen Berechnungen	62
4.19	Homogenitätsbereich von Spulensystemen	64
5.1	Die Vakuumkammer	66
5.2	Probenkapsel	67
5.3	Mechanische Staubkanonen zur Staubdispergierung	70

5.4	Elektrische Staubkanone zur Staubdispergierung	71
5.5	Test der Dispersionswirkung der Staubkanone	72
5.6	Langbrennweitiges Mikroskop	73
5.7	Blitzlampe mit Steuergerät	74
5.8	CCD-Kameras	75
5.9	ADAM+EVE-Experimentaufbau	77
5.10	Beschleunigungssensor	79
5.11	Druckmeßgerät	80
5.12	Magnetometer	81
5.13	Dreiaxsiges Rechteckspulensystem	83
5.14	Feldverlauf in Spulensystem	85
5.15	Haupttrack des ADAM+EVE-Aufbaus im Flugzeug	87
5.16	ADAM+EVE-Koordinatensysteme	88
5.17	Flugrouten der ADAM+EVE-Kampagne	89
5.18	CAIN+ABEL-Koordinatensysteme	90
5.19	Flugrouten der CAIN+ABEL-Kampagne	92
6.1	Beschleunigung während der 1. Parabel des Fluges 218.	94
6.2	Magnetfeldkompensation während des ADAM+EVE-Experimentes	95
6.3	Magnetfeld während des ADAM+EVE-Experimentes	98
6.4	Magnetfeldkompensation während des CAIN+ABEL-Experimentes	99
6.5	Magnetfeldmanipulation während des CAIN+ABEL-Experimentes	101
6.6	<i>In-situ</i> -Aufnahme eines Aggregates der CAIN+ABEL-Kampagne	104
6.7	Beispiele für Aggregatausrichtung	105
6.8	Beispiele für Aggregate	106
6.9	Schematische Darstellung der Partikelablagerung	107
6.10	Ausrichtungswinkel von Aggregaten	108
6.11	Verteilung der Ausrichtungswinkel	109
6.12	Längenverteilung der Aggregate aus CAIN+ABEL	110
6.13	Längenverteilung der Aggregate aus ADAM	111
6.14	Aggregatausrichtung unter verschiedenen magnetischen Bedingungen	112
6.15	Strukturanalyse von Aggregaten	113
6.16	Modelliertes Aggregat	114
6.17	Verteilung der fraktalen Dimension der gewachsenen Aggregate	115
6.18	Unter kompensierten Bedingungen gewachsene Beispielaggregate	116
6.19	Unter konstantem Feld gewachsene Beispielaggregate	117
6.20	Beispiel für Aggregatstruktur	118
6.21	Gegenüberstellung der fraktalen Dimensionen	123
A.1	Staubvorsatz für die Staubkanone	130
B.1	Schematischer Plan des Kompensationssystems	131
B.2	Elektronischer Schaltplan des Beschleunigungssensors	132

Tabellenverzeichnis

4.1	Magnetische Eigenschaften der verwendeten Stäube	43
4.2	Eigenschaften der verwendeten Staubsorten	44
4.3	Inklination des Erdmagnetfeldes in den Fluggebieten	51
5.1	Parameter der verwendeten CCD-Kameras	74
5.2	Abbildungsverhältnisse der verwendeten CCD-Kameras	74
5.3	Koordinatensysteme des ADAM+EVE-Aufbaus	88
5.4	Koordinatensysteme des CAIN+ABEL-Aufbaus	90
6.1	Einschußliste der Flüge 1 und 2, ADAM+EVE	96
6.2	Einschußliste der Flüge 2 und 3, ADAM+EVE	97
6.3	Einschußliste der Flüge 1 und 2, CAIN+ABEL	102
6.4	Einschußliste der Flüge 2 und 3, CAIN+ABEL	103
6.5	Eigenschaften der gewachsenen Aggregate	120

Liste der verwendeten Formelzeichen und Konstanten

Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
a	Beschleunigung	m s^{-2}
B	magnetischer Fluß, Magnetfeld	T
B_R	remanente magnetische Induktion	T
c	Konstante	[1]
D	Deklination des Erdmagnetfeldes	°
D_f	fraktale Dimension	[1]
D_{eff}	effektive fraktale Dimension	[1]
d_E	Grenzgröße für Blochwände	m
E	Elastizitätsmodul	N m^{-2}
H_C	Koerzitivfeldstärke	A m^{-1}
I	Inklination des Erdmagnetfeldes	°
I^*	korrigierte Inklination	°
J	Trägheitsmoment	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$
L	Drehimpuls	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$
Kn	Knudsenzahl	[1]
M	Drehmoment	Nm
M_*	Sternenmasse	kg
M_j	Jeans-Masse	kg
M_s	Sättigungsmagnetisierung	A m^{-1}
M_t	Partikelmagnetisierung	A m^{-1}
m	Masse allgemein	kg
m_a	Aggregatmasse	kg
m_t	Partikelmasse	kg
n	Teilchenzahl	[1]
N_{SP}	Windungszahl vom Spulensystem	[1]
p	Druck	Pa
R	reduzierter Radius	m
R_{gyr}	Gyrationsradius	m
r	Abstand/Radius allgemein	m
r_a	Aggregatlänge	m
r_g	Radius der Gasmoleküle	m

Liste der verwendeten Formelzeichen und Konstanten

Symbol	Bedeutung	Einheit
r_{SP}	Spulenradius	m
r_t	Partikelradius	m
r_{tt}	Partikelabstand	m
s	Weg	m
T	Temperatur	K
$T_C; T_N$	Curietemperatur; Néeltemperatur	K
t	Zeit allgemein	s
t_e	Ankoppelzeit	s
t_f	Fallzeit	s
v	Geschwindigkeit allgemein	m s^{-1}
v_c	Haftgrenzgeschwindigkeit	m s^{-1}
v_{flucht}	Fluchtgeschwindigkeit	m s^{-1}
v_t	Partikelgeschwindigkeit	m s^{-1}
v_{th}	thermische Geschwindigkeit	m s^{-1}
β, β^*	geographische bzw. geomagnetische Breitengrade	$^\circ$
γ_o	Oberflächenenergie pro Fläche	J m^{-2}
λ, λ^*	geographische bzw. geomagnetische Längengrade	$^\circ$
λ_L	Lichtwellenlänge	m
λ_t	freie Weglänge	m
μ_a	magnetisches Moment eines Aggregates	Am^2
μ_m	Molekularmasse	kg
μ_{spez}	spezifische Sättigungsmagnetisierung	$\text{A m}^2 \text{kg}^{-1}$
μ_t	magnetisches Moment eines Partikels	A m^2
ν	Frequenz	s^{-1}
ρ	Dichte	kg m^{-3}
σ	Wirkungsquerschnitt	m^2
σ_w	Blochwandenergie	J
σ_m	magnetischer Wirkungsquerschnitt	m^2
τ	optische Dichte	[1]
Ω	Keplerfrequenz	s^{-1}
ω	Winkelgeschwindigkeit	$^\circ/\text{s}$ bzw. radian

Konstanten und Maßeinheiten

Symbol	Bedeutung	Größe und Einheit
AE	Astronomische Einheit	$1 \text{ AE} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$
g	Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$
k_B	Boltzmannkonstante	$k_B = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
M_\odot	Sonnenmasse	$M_\odot = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
m_u	Atommassenkonstante	$m_u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Pc	Paralaxensekunde	$1 \text{ Pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$
r_E	mittlerer Erdradius	$r_E = 6371 \text{ km}$
γ	Gravitationskonstante	$\gamma = 6,6727 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
μ_0	magnetische Feldkonstante	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ V s A}^{-1} \text{ m}^{-1}$

Erläuterungen von verwendeten Begriffen und Abkürzungen

- ADAM:** Aggregation of **D**ust **A**ccelerated by **M**agnetic forces
ADAM+EVE: Aggregation of **D**ust **A**ccelerated by **M**agnetic forces and the Earth's magnetic field dependence **V**erification **E**xperiment
CAIN+ABEL: **C**lustering **A**ggregates **I**n **N**eutral magnetic conditions and **A**cceleration of aggregation **B**y **E**xternal **f**ie**L**ds
HST: **H**ubble **S**pace **T**elescope
IGEP: **I**nstitut für **G**eophysik und **e**xtraterrestrische **P**hysik der **TU** Braunschweig
ISM: **I**nterstellares **M**edium
Kometesimal: Zusammengesetztes Wort aus Komet und infinitesimal, kleine Bausteine, aus denen die Kometen gewachsen sind.
Nummern der einzelnen Parabelflüge:
Vol. 156, Parabelflug der ESA SPFC 5 am 11.09.2002
Vol. 157, Parabelflug der ESA SPFC 5 am 12.09.2002
Vol. 218, Parabelflug der ESA PFC 36 am 23.03.2004
Vol. 219, Parabelflug der ESA PFC 36 am 24.03.2004
Vol. 220, Parabelflug der ESA PFC 36 am 24.03.2004
Vol. 221, Parabelflug der ESA PFC 36 am 25.03.2004
Vol. 266, Parabelflug der ESA PFC 40 am 28.06.2005
Vol. 267, Parabelflug der ESA PFC 40 am 29.06.2005
Vol. 268, Parabelflug der ESA PFC 40 am 30.06.2005
PFC: **P**arabolic **F**light **C**ampaign, Parabelflugkampagne
PFC 30: 30. ESA Parabelflugkampagne 7.5.2001-18.5.2001
PFC 36: 36. ESA Parabelflugkampagne 15.3.2004-26.3.2004
PFC 40: 40. ESA Parabelflugkampagne 20.6.2005-1.7.2005
Planetesimal: Zusammengesetztes Wort aus Planet und infinitesimal, kleine Bausteine aus denen die Planeten gewachsen sind.
SEM: **S**canning **E**lectron **M**icroscope, Elektronenmikroskop
SPFC: **S**tudent **P**arabolic **F**light **C**ampaign, von der ESA jährlich durchgeführte studentische Parabelflugkampagne
SPFC 3: 3. ESA Student Parabolic Flight Campaign, 16.10.2000-27.10.2000
SPFC 5: 5. ESA Student Parabolic Flight Campaign, 2.9.2002-13.9.2002
ZARM: **Z**entrum für **A**ngewandte **R**aumfahrttechnologie und **M**ikrogravitation der **U**niversität **B**remen

1 Einleitung

Seit jeher war der Mensch auf der Suche nach den Ursprüngen der Körper, die er am nächtlichen Himmel entdecken konnte. Frühe Weltbilder sprachen von „Löchern im Himmelszelt“ und unterschieden die Objekte nur aufgrund ihrer Helligkeit (Sonne, Mond, Sterne) oder ihres Bewegungsablaufs (Sterne, Wandelsterne = Planeten). Nachdem diese Weltbilder der Antike und des Mittelalters zunächst bezweifelt und dann teilweise verworfen oder korrigiert worden waren, begannen verschiedene Naturwissenschaftler im 16. und 17. Jahrhundert die Mechanik und Entstehung der Objekte am Himmel näher wissenschaftlich zu untersuchen. Mit Hilfe der Berechnungen und Entdeckungen von Kopernikus (1543) und Galileo (1630) gelang es, das geozentrische Weltbild des Ptolemäus zu Gunsten des heliozentrischen Weltbilds zu verwerfen. Nun konnten die bis dahin nur mit Hilfsannahmen erklärten Bahnen der bekannten Planeten einfach beschrieben werden. Mit seinen Gesetzen schuf Kepler (1609) die Basis für weitere himmelsmechanische Betrachtungen.

Bereits im darauffolgenden 18. Jahrhundert versuchten namhafte Wissenschaftler und Philosophen, die Entstehungsgeschichte unserer Planeten zu ergründen. Kant (1755) und Laplace (1796) entwickelten Theorien, die von einer Entwicklung des Planetensystems aus einer interstellaren Gas- und Staubwolke ausgehen. Dabei ließ bereits damals die Erkenntnis, daß alle Planeten sowie auch viele kleinere Körper des Sonnensystems, die um die Sonne rotieren, in einer ausgezeichneten Ebene, der Ekliptik, rotieren, Rückschlüsse auf eine gemeinsame Entstehungsgeschichte von Sonne und Planeten zu. In diesen frühen Arbeiten wird bereits davon ausgegangen, daß die Sonne gemeinsam mit ihrem Planetensystem entstanden ist. Mit der Erkenntnis, daß es sich bei der Sonne um einen Stern wie viele andere handelt und daß sich auch um viele andere Sterne Planeten in ähnlichen Systemen bewegen (Schneider 2005), wurde die Fragestellung nach der Entstehung unseres Planetensystems in der zweiten Hälfte der neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts zur allgemeinen Frage nach der Entstehung von Planetensystemen erweitert (siehe Kapitel 2.1).

Inzwischen wurden die Theorien zur Planetenentstehung weiter verfeinert. Nachdem der Prozeß der Sternentstehung erkannt worden war, war man sich endgültig einig, daß die Planeten im Zuge der Sternengeburt gleichzeitig mit den jeweiligen Muttersternen entstanden sein mußten (vgl. Kapitel 2.1.1). Man entwickelte eine Theorie der Akkretions-scheiben oder protoplanetaren Scheiben (siehe Kapitel 2.1.2). Diese folgte analog zur Sternentstehung, daß das Wachstum der Planeten innerhalb der protoplanetaren Scheibe eines jungen Sterns von Gravitationsinstabilitäten angestoßen worden sei. Dabei ging man davon aus, daß sich durch Störungen und Inhomogenitäten im Gravitationsfeld des Sterns Verklumpungen des lokalen Staubmediums bildeten, die erste Planetesimale und

Kometesimale bildeten. Diese zogen danach, um den Stern rotierend, die Staub- und Gasmassen auf ihrem Wege gravitativ an und wuchsen so langsam zu Planeten beziehungsweise Kometen.

Mitte der neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts wurden die bisherigen Annahmen der gravitativen Planetenentstehung angezweifelt (Weidenschilling 1995). Es wurde gezeigt, daß der Mechanismus der gravitativen Wechselwirkung von mikrometergroßen Kleinstpartikeln so wie angenommen nicht funktionieren konnte, da auf diesen Größenskalen die Akkretion von Planetesimalen oder Kometesimalen zum einen sehr viel länger gedauert hätte, als Zeit zur Verfügung stand, zum anderen aber durch turbulente Bewegungen im frühen Sonnennebel stark behindert worden wäre. Die wirksame Akkretion durch Gravitation setzt erst bei einer „Partikelgröße“ von etlichen hundert bis tausend Metern ein. Als Ausweg, um ausgehend von mikrometergroßen Partikeln zu einem Wachstum von meter- bis kilometergroßen Objekten zu kommen, wurde die Koagulation oder Agglomeration angenommen. Dabei lagern sich Staubteilchen, die sich zufällig begegnen, aneinander an und bilden größere Strukturen. Setzt man diesen Prozeß weiter fort, werden schnell Strukturen im benötigten Bereich gebildet (siehe Kapitel 2.4.1). Inzwischen ist diese Ansicht weitestgehend anerkannt. Man geht also davon aus, daß die ersten Schritte des Wachstums von Planeten auf Koagulation basieren.

Ein Teil der Materie von Gas- und Staubwolken im Universum besteht aus potentiell magnetischem Material (siehe Kapitel 2.2.1). Weiterhin herrschen in Sternentstehungsgebieten, insbesondere nach der Entstehung der Protosterne, teilweise hohe Magnetfelder (vgl. Kapitel 2.3). Die meisten der bisherigen theoretischen oder experimentellen Arbeiten zur Koagulation von Mikrometerpartikeln im Zusammenhang mit der Entstehung von Planeten vernachlässigen diese magnetischen Partikel und Felder bei ihrer Betrachtung. Nübold (2001) untersuchte sowohl theoretisch als auch experimentell den Einfluß von Magnetisierung der koagulierenden Partikel. Dabei zeigte sich ein deutlicher Einfluß der Partikelmagnetisierung auf den Koagulationsprozeß. Wie bei vorigen Arbeiten, die nicht im Zusammenhang zur Planetenentstehung standen, wurden dabei Einflüsse der Magnetisierung der Partikel sowohl auf die Geschwindigkeit des Koagulationsprozesses, als auch auf die Struktur der entstehenden Aggregate gefunden. Bei diesen Untersuchungen wurde weitgehend nur die Magnetisierung der Partikel, nicht aber der Einfluß externer Magnetfelder beachtet.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein besseres Verständnis der Koagulationsvorgänge zu erhalten, die nach dem Entstehen eines jungen Sterns in dessen protoplanetarer Scheibe ablaufen, in besonderer Hinsicht auf den Einfluß magnetischer Felder, die nicht von den Partikeln selber hervorgerufen werden. Dazu werden Koagulationsexperimente mit verschiedenen magnetischen und nichtmagnetischen Mikrometerpartikeln unter verschiedenen magnetischen Bedingungen durchgeführt. Im Zuge dieser Experimente ist es von entscheidender Bedeutung, die Umgebungsbedingungen des frühen Sonnennebels so gut wie möglich nachzubilden (vgl. Kapitel 3). Besonders sei hier die Mikrogravitation, also angenäherte Schwerelosigkeit, unter den Bedingungen hervorgehoben. Diese läßt sich nur unter Schwierigkeiten erzeugen, so daß die Experimente auf Parabelflügen durchgeführt werden müssen. Zusätzlich muß in geeigneter Weise verhindert werden, daß das Magnetfeld

der Erde und andere Störfelder Einfluß auf die Aggregationsexperimente ausüben. Die technische Umsetzung dieser beiden Bedingungen stellt die größte Herausforderung an das Experiment dar (vgl. Kapitel 4.6 und Kapitel 3.2).

2 Planetenentstehung und Staubaggregation

Die Untersuchung des Aggregationsverhaltens von magnetischen Stäuben steht in direktem Zusammenhang mit der Entstehung von Planetensystemen. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen der Bildung von Sternen und ihrer Planetensysteme, deren Struktur und Zusammensetzung. Weiterhin werden das Auftreten von Magnetfeldern im Universum und die mikroskopischen Vorgänge bei Aggregationsprozessen näher erläutert.

2.1 Entstehung von Sternen- und Planetensystemen

2.1.1 Sternentstehung - von Gas und Staub zum Stern

Die Entwicklung eines Sonnen- oder Sternensystems beginnt in einer Wolke interstellaren Gases und Staubs. Dabei besteht eine solche Wolke zu großen Teilen aus Gas. Der Staubanteil liegt in der Größenordnung von einem Prozent (Unsöld und Baschek 1999). In der Regel sind diese Wolken sehr groß und übersteigen die Masse eines entstehenden Sterns bei weitem. Beispiele für solche Wolken in näherer Umgebung der Sonne sind der Adlernebel (M16¹) in 7000 Lichtjahren Entfernung und der Orionnebel (M42) in 1500 Lichtjahren Entfernung (siehe Abb. 2.1). Diese beiden Himmelsobjekte sind aufgrund ihrer Nähe relativ gut zu beobachten und wurden im letzten Jahrzehnt mit dem Hubble Space Teleskop (HST) erforscht. Während der Sternentstehungsphase wachsen in solchen Gas- und Staubbewolungen mehrere Sterne gleichzeitig heran. In der vergrößerten Abbildung des oberen Teiles des Adlernebels (Abb. 2.2.a) kann man kleine, taschenförmige Gas- und Staubverdichtungen erkennen. Bei ihnen handelt es sich wahrscheinlich um Wolkenteile, in denen junge Sternensysteme wachsen.

Ausgehend von einer solchen Wolke aus Gas und Staub beginnt die Sternentstehung, sofern die Masse der Wolke die sogenannte *Jeans-Masse* von

$$M_j = 5,45 \cdot \sqrt{\left(\frac{k_B T}{\mu_m m_u \gamma}\right)^3} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varrho}} \quad (2.1)$$

¹Die Bezeichnung M16 rührt von der im achtzehnten Jahrhundert von Charles Messier eingeführten Nomenklatur für diffuse Nebel, den sogenannten Messier-Objekten. Der Orionnebel wurde damals mit M42 benannt, der Adlernebel mit M16.

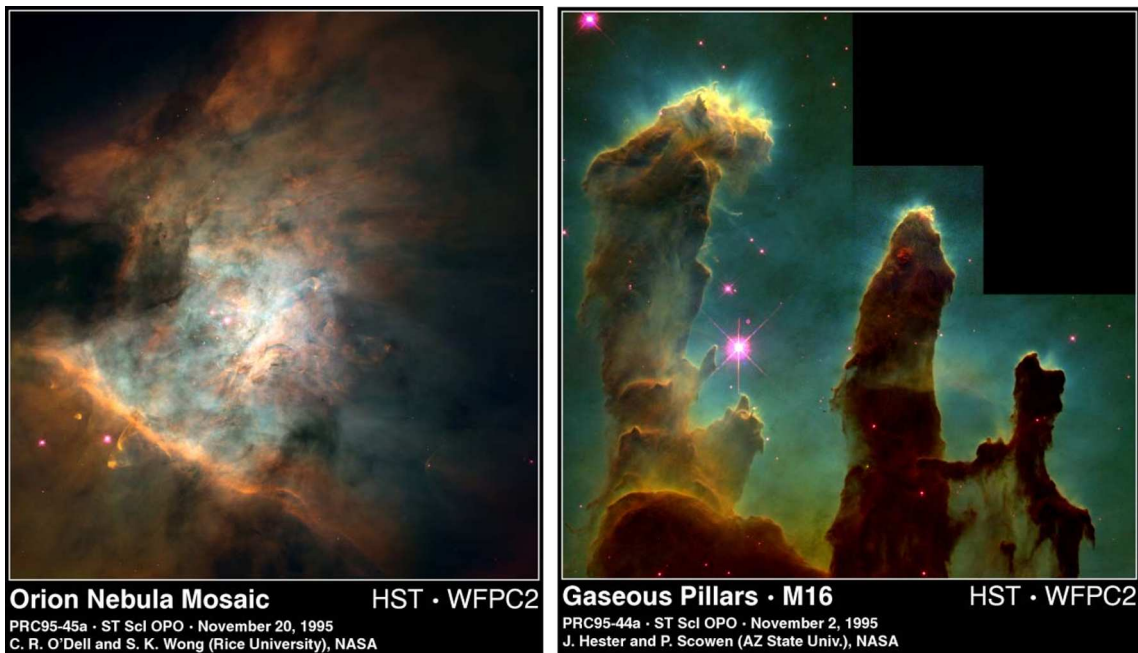


Abbildung 2.1: Gas- und Staubnebel, zwei Mosaikaufnahmen der *Widefield and Planetary Camera 2* des Hubble Space Teleskops (HST): a) Die linke Abbildung zeigt den Orionnebel M42, die rechte b) den Adlernebel M16 (Quelle: HST-Images 2005).

übersteigt (Unsöld und Baschek 1999). Hierbei ist T die Temperatur der Wolke in Kelvin, μ_m das Molekulargewicht des Gases, m_u die Atommassenkonstante und ρ die Dichte. Typische Temperaturen in interstellaren Gas- und Staubwolken liegen zwischen 20 K in kalten Gaswolken und einigen tausend Kelvin in heißeren Wolken. Dabei liegt die Teilchenzahl in Bereichen zwischen $n = 10^6 \text{ cm}^{-3}$ in dünnen Wasserstoffwolken und $n = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ in den dichtesten Dunkelwolken (Kartunnen et al. 1987), was Drücken von 10^{-8} Pa bis 10^{-14} Pa entspricht.

Liegt die Masse einer Wolke oberhalb der entsprechenden *Jeans-Masse*, so beginnt die Wolke aufgrund ihrer eigenen Gravitation zu kollabieren. Die *Jeans-Masse* ist hierbei von Bedeutung, weil über dieser Grenzmasse die potentielle Energie der Gase und Staubteilchen die kinetische Energie übersteigt und somit eine Kontraktion einsetzen kann. Man spricht von einer Gravitationsinstabilität. In der Regel haben solche kontrahierenden Wolken eine Masse von mehreren tausend Sonnenmassen und eine Ausdehnung von einigen Parallaxensekunden. Bei der Kontraktion wird die frei werdende gravitative Energie aufgrund der geringen optischen Dicke² der Wolke abgestrahlt. Wegen der zunehmenden Teilchendichte der Wolke, sinkt auch die *Jeans-Masse*, daher kann die Gas- und Staubwolke in einzelne kleinere Wolken fragmentieren, die jeweils für sich das *Jeanskriterium* erfüllen und daher unter ihrer Gravitation separat kontrahieren. Später bilden diese fragmentierten Teilwolken jeweils ein Sternensystem.

²Die optische Dicke τ ist ein Maß für die Durchlässigkeit eines Mediums für elektromagnetische Strahlung. Passiert elektromagnetische Strahlung ein Medium mit $\tau = 1$ dann fällt ihre Strahlungsdichte relativ zum Beobachter auf das $1/e$ -fache ab. Man spricht bei $\tau > 1$ von optisch dicken Medien.

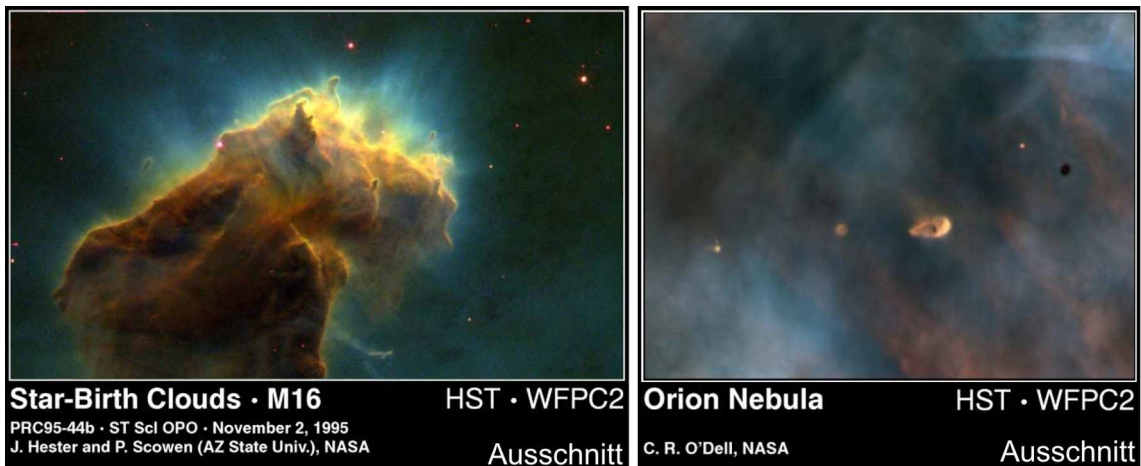


Abbildung 2.2: Sternentstehungsgebiete im Adler- und Orionnebel: a) Das linke Bild zeigt einen Ausläufer des Adlernebels, in dem taschenartige Ausstülpungen zu erkennen sind. In ihnen wachsen junge Sterne heran. b) Das rechte Bild zeigt einen Ausschnitt des Orionnebels mit mehreren jungen Sternen. In ihrer Umgebung sind protoplanetare Scheiben zu erkennen, die vom Licht der aufleuchtenden Sterne angestrahlt werden (Quelle: HST-Images 2005).

Die Kontraktion setzt sich fort, bis die Einzelwolken eine Dichte erreicht haben, bei der sie optisch dick werden. Die freiwerdende Energie kann nicht mehr abgestrahlt werden, es kommt zu einer Aufheizung der Wolke und damit zu einem Anstieg der *Jeans-Masse*. Die Fraktionierung bricht ab. Erhöhte Temperatur und steigende Dichte führen zu einem Druckanstieg im Inneren der Wolke. Dieser wirkt sich stabilisierend auf die Wolke aus und bremst den Kollaps, da das Gas nicht mehr frei in Richtung Zentrum fallen kann. In diesem Zustand liegt der Protostern im Zentrum seiner Gaswolke. In ihm steigen Dichte und Temperatur weiter an, bis die Bedingungen für eine thermonukleare Reaktion ausreichend sind und der Stern zu leuchten beginnt. In seiner Umgebung sedimentieren Gas und Staub zur Zentralebene hin, da sie aufgrund des ihnen eigenen Drehimpulses nicht zum Zentrum der Wolke wandern können, ohne diesen abzugeben - es entsteht eine protoplanetare Scheibe aus Gas und Staub, wie am Beispiel des Orionnebels (Abb. 2.2.b) deutlich zu erkennen ist. Die Entwicklung bis hierher ist in Abbildung 2.4 a-c illustriert. In dieser Scheibe müssen sich nun die Planeten bilden, bevor der neu aufleuchtende Stern mit dem Ausstoß von solaren Winden beginnt, welche alle leichten Bestandteile inklusive Gas und Staub aus dem System herauswehen würden.

2.1.2 Entwicklung von protoplanetaren Scheiben

Die Entwicklung von Protoplanetaren Scheiben beginnt mit der Sedimentation des Materials des protoplanetaren Nebels zur Zentralebene hin. Dies ist damit bei der Bildung der Scheibe der zentrale Prozeß. Die Gravitation zieht die Partikel der Wolke zum Zentralstern hin. Da diese jedoch aus der Rotation der Galaxie Drehimpuls mit sich tragen, ist es ihnen aufgrund der Drehimpulserhaltung nicht möglich, direkt radial zum Zentralstern zu fallen. Es kommt in diesem Fall nur der Anteil der gravitativen Anziehungskraft zum

Tragen, der parallel zum Drehimpulsvektor wirkt. Die Gase und Staubpartikel werden zur Zentralebene hin beschleunigt und verdichten sich dort zu einer protoplanetaren Scheibe. Abbildung 2.3 verdeutlicht den Vorgang.

Die Massen von protoplanetaren Scheiben von Sternen durchschnittlicher Masse werden von Natta et al. (2000) mit 0,02 bis 0,2 Sonnenmassen angegeben, was etwa 0,001 bis 0,5 der Masse des Sterns, den sie umgeben entspricht. Allerdings wird nur ein sehr kleiner Teil davon für die Entstehung von Planeten benötigt. Hollenbach et al. (2000) nennen einen Wert von etwa 0,013 Sonnenmassen. Der Rest der Masse wird während der Lebensdauer der Scheibe größtenteils in den Stern aufgenommen, ein kleiner Teil wieder dem interstellaren Medium (ISM) zugeführt. Dabei scheint die Entwicklung der Scheibenmasse die ersten 10^5 bis 10^7 Jahre konstant zu verlaufen, während nach Ablauf dieser Zeit eine rapide Abnahme zu beobachten ist (Natta et al. 2000).

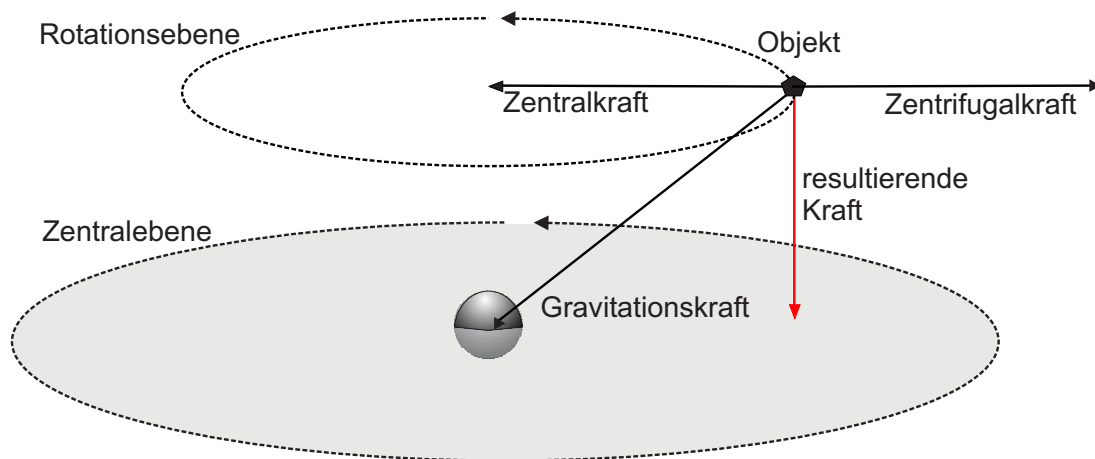


Abbildung 2.3: Die Sedimentation von Staubmaterial einer interplanetaren Wolke zur Zentralebene hin: Der senkrechte Pfeil markiert die resultierende Kraft, die die Ablagerung des Materials auf der Zentralebene bewirkt. Der Mechanismus wirkt sowohl oberhalb der Ebene als auch unterhalb.

Sowohl Strom et al. (1993) als auch Hollenbach et al. (2000) geben als Obergrenze für den Zeitraum der Existenz von Akkretionsscheiben um Sterne, die der Sonne ähneln, $2 \cdot 10^6$ bis 10^7 Jahren an. Als Grund für das Verschwinden der protoplanetaren Scheiben sind von ihnen mehrere Prozesse diskutiert worden. Einer davon ist der *blow-off* des Gases und des Staubes durch das auf das Magnetfeld des neu entstandenen Sterns zurückzuführende Einsetzen von stellaren Winden. Diese entfernen die leichten Komponenten der protoplanetaren Scheibe aus dem System. Eine weitere Möglichkeit zum Verlust von Material in protoplanetaren Scheiben ist die sogenannte *Photoevaporation*³. Dies ist ein Prozeß, bei dem aufgrund von Strahlungswirkungen verschiedener Objekte – zum Beispiel des jungen Sterns selber oder anderer Strahlungsquellen in der Umgebung – Partikel

³Bei der *Photoevaporation* werden Gase oder Staubteilchen durch Aufheizung aufgrund von Bestrahlung auf eine thermische Geschwindigkeit v_{th} größer als die Fluchtgeschwindigkeit aus dem System v_{flucht} erhitzt und verlassen so beschleunigt das System. Als Energiequelle für diesen Prozeß kommen der nahe Zentralstern oder auch andere Sterne in der Umgebung des jungen Sterns in Betracht.

aus der Scheibe entfernt werden. Insbesondere in den Außenbereichen der protoplanetaren Scheibe, ab etwa 10 AE, wäre dieser Prozeß effektiver als der *blow-off*.

Statistische Untersuchungen von beobachteten protoplanetaren Scheiben scheinen die Obergrenze der Lebensdauer von 10^7 Jahren zu bestätigen (Strom et al. 1993, Wadhwa und Russel 2000). Somit ist die charakteristische Lebensdauer von Akkretionsscheiben mitunter kürzer als der Zeitraum, der nach früheren Meinungen benötigt wird, um gravitativ Planeten aus den Staubmassen der Scheiben wachsen zu lassen.

2.1.3 Planetenentstehung - vom Staub zum Planeten

Am Beginn der Entstehung von Planeten steht zunächst ein junges Sternensystem mit einer Protosonne im Zentrum und einer sie umgebenden protoplanetaren Scheibe. Solche protoplanetaren Scheiben sind mit dem Hubble Space Telescope (HST) bereits in näheren Sternentstehungsgebieten beobachtet worden. Ein Beispiel hierfür kann man in Abbildung 2.2 erkennen: Im Bild auf der rechten Seite (b) ist ein Ausschnitt des Orionnebels zu erkennen, in dem mehrere junge Sterne zu sehen sind. Diese haben teilweise eine diffuse Materiescheibe um sich, die als protoplanetare Scheibe identifiziert wird. Insbesondere das helle Objekt in der Bildmitte zeigt eine scheibenförmige Struktur, die in der Mitte aufgrund der höheren Dichte etwas abgedunkelt ist.

Weiterhin gibt es indirekte Hinweise auf protoplanetare Scheiben: Der sogenannte Infrarotexzess, der bei der Beobachtung von jungen Sternen (z.B. T-Tauri-Sterne) zu beobachten ist, ist ein Effekt der thermischen Strahlungsemission von Staub in Akkretionsscheiben. Diese Emission ist auf die Anregung von 800 bis 1500 K „kühlen“ Staubpartikeln in der Akkretionsscheibe aufgrund der Bestrahlung des jungen Sterns im Zentrum und deren Abstrahlung im Infrarotbereich zurückzuführen. Die Spektren solcher jungen Sterne weisen eine erhebliche Abstrahlung im IR-Bereich auf, was als Folge einer vorhandenen Staubscheibe gedeutet wird (Rydgren und Cohen 1985, Calavet et al. 2000). Weiterhin haben protoplanetare Scheiben teilweise kollimierende Wirkung auf Protosternenwinde. Dabei lassen sich bei jungen Sternen kegelförmige Abstrahlungen senkrecht zur Scheibe beobachten, da in Scheibenrichtung die Ausbreitung der Protosternenwinde noch durch die Materie in der protoplanetaren Scheibe behindert wird (Unsöld und Baschek 1999).

Unterstützt von der Entdeckung von Planeten um viele andere Sterne, die in den letzten Jahren gemacht worden sind (Marcy et al. 2000) und deren Untersuchung (Santos et al. 2003) gilt es als bewiesen, daß das Wachstum von Planeten innerhalb dieser Scheiben beginnen muß. Eine aktuelle Übersicht der außerhalb unseres Sonnensystems entdeckten Planeten findet sich bei Schneider (2005). Weiterhin spricht für die Entstehung von Planeten in protoplanetaren Scheiben, daß sowohl die Planeten unseres Sonnensystems als auch die Planeten von anderen Mehrfachsystemen rotieren jeweils annähernd in einer Ebene, der Ekliptik, um ihren Zentralstern rotieren⁴.

⁴In diesem Zusammenhang wird zur Zeit diskutiert, ob Pluto aufgrund seiner stark von der Ekliptik abweichenden und exzentrischen Bahn, die sogar die Bahn des Neptun kreuzt, überhaupt den Planeten zuzuordnen ist. Nach der Entdeckung mehrerer größerer Objekte auf ähnlichen, exzentrischen Bahnen außerhalb

Innerhalb dieser protoplanetaren Scheibe, die, wie in Kapitel 2.1.1 bereits erörtert, zu 99% aus Gas und zu einem Prozent aus Staubteilchen besteht, muß nun ein Prozeß stattfinden, der aus diesen Staub- und Gasteilchen größere Objekte wachsen läßt. Die ersten Ansätze zur Entstehung von Planeten aus Gas und Staubwolken im achtzehnten Jahrhundert gehen bereits auf Kant (1755) und Laplace (1796) zurück. Spätere Ansätze in den 70er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts von Safronov (1973) sowie Goldreich und Ward (1973) lieferten Modelle zur Planetenentstehung aufgrund ähnlicher Kriterien der Gravitationsinstabilität wie bei der Sternentstehung. Wegen der turbulenten Bewegungen innerhalb der Mittelebene der protoplanetaren Scheibe, die die Gravitationsinstabilitäten verhindern, wurden diese Modelle jedoch Mitte der neunziger Jahre verworfen (Weidenschilling 1995).

Die Lösung des Problems liegt in der Koagulation von kleinen Staubpartikeln. Diese stoßen, haften aneinander und bilden dabei Staubaggregate. Eine nähere Betrachtung dieser Aggregationsprozesse findet in Kapitel 2.4 statt. Die Aggregate wachsen weiter und bilden schließlich größere Objekte - Planetesimale und Kometesimale - die dann in der Lage sind, gravitativ wechselzuwirken. Beginnt erst einmal die Wirkung der Gravitation zu dominieren, so können aus den Planetesimalen schnell größere Objekte wachsen. Je massereicher diese Objekte sind, desto mehr Gas und Staub aus der Umgebung können sie anziehen und aufsammeln.

Der Temperaturgradient vom Zentrum des jungen Sternensystems zu seinen äußeren Bereichen bedingt aufgrund der variierenden Kondensationstemperaturen verschiedener Mineralien und Materialien einen chemischen Gradienten in den auskristallisierenden Verbindungen. So frieren in der Nähe des heißen Protosterns zunächst die weniger volatilen Elemente und Verbindungen aus, während mit zunehmendem Abstand zum Zentrum auch die leichter flüchtigen Stoffe kondensieren (vgl. Kapitel 2.2.4).

der Ekliptik, die zum Teil sogar eigene Monde haben (Brown 2005), scheint Pluto eher zu den sogenannten *Kuiper-Belt-Objekten* zu gehören und damit einer anderen Entstehungsgeschichte als die anderen acht Planeten zu unterliegen. Eine Klärung seines Status' wird in den nächsten Jahren von der International Astronomical Union (IAU) erwartet.

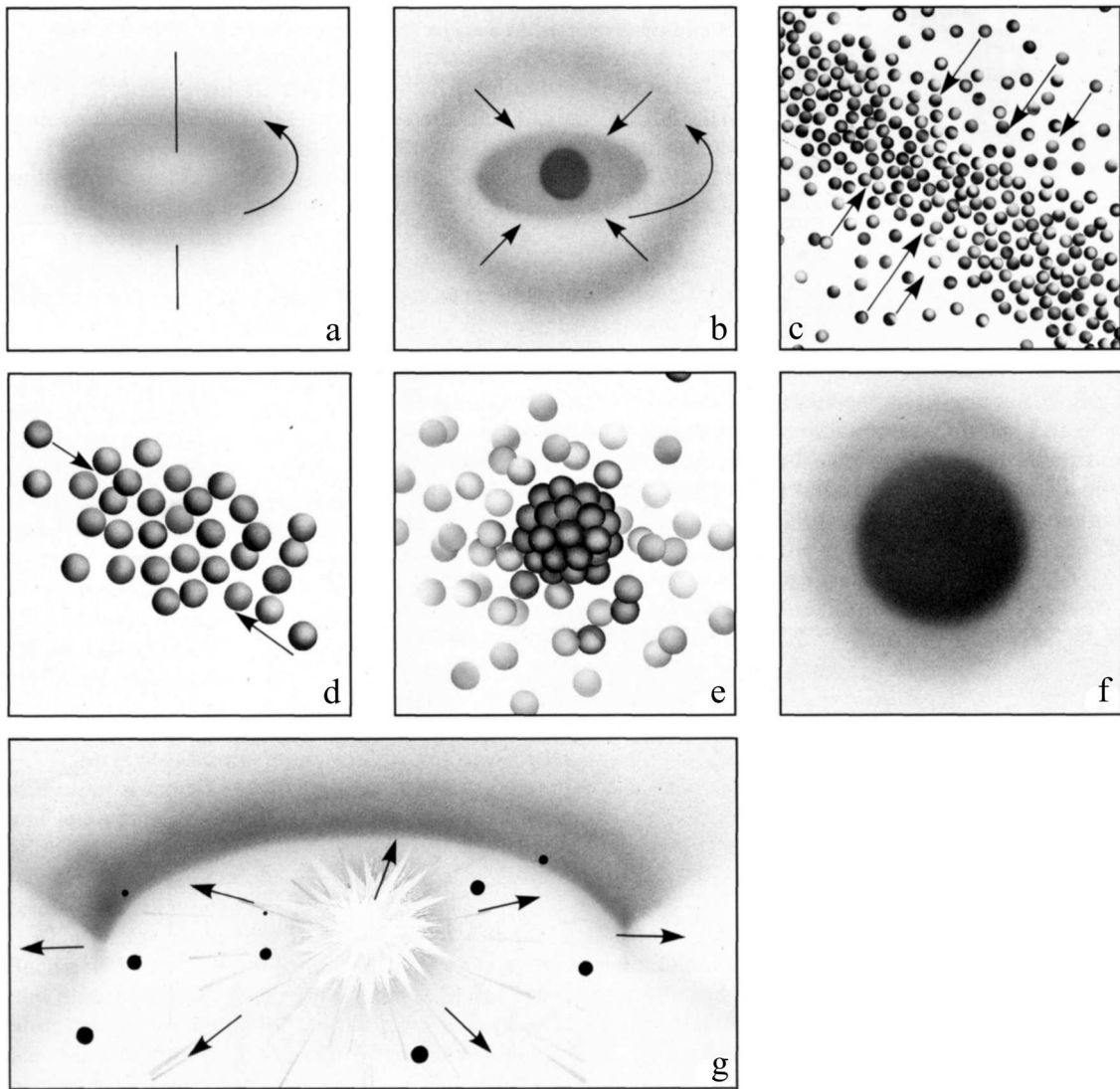


Abbildung 2.4: Schematische Abbildung der Entstehung von Planetensystemen: Eine interstellare Wolke aus Staub und Gas beginnt unter ihrer eigenen Gravitation zu kollabieren (a). Im Zentrum der Wolke bildet sich eine Verdichtung, die später den Stern bilden wird. Die Materie um das Zentrum herum nimmt den Drehimpuls des Gases aus der Rotation der Galaxie auf und bildet eine rotierende Scheibe in der Zentralebene (b). Die Staubpartikel sedimentieren zu Mittelebene hin, es entsteht eine protoplanetare Scheibe (c). Aufgrund der Relativbewegung der einzelnen Partikel untereinander stoßen die Teilchen und bleiben aneinander haften. Es bilden sich zunächst Staubaggregate (d), aus denen nach einiger Zeit Planetesimale wachsen. Die Planetesimale ziehen sich aufgrund der Gravitationskräfte zwischen ihnen gegenseitig an (e) und wachsen zu größeren Planeten (f). Die Entstehung von Planetesimalen kommt zum Erliegen, sobald der einsetzende Sternwind des jungen Sterns einsetzt und den restlichen Staub und das Gas aus dem neuen Sternensystem herausweht (g) (Quelle: Kartunnen et al. 1987).

2.2 Zusammensetzung verschiedener Himmelskörper

Sowohl die chemische Zusammensetzung, als auch die Struktur von Himmelskörpern können Rückschlüsse auf die Entstehungsgeschichte von Planeten und Planetensystemen liefern. Die folgenden Kapitel geben eine Übersicht über Eigenschaften, Struktur und Komposition verschiedener Himmelskörper, um daraus Rückschlüsse über deren Entstehungsgeschichte ziehen zu können.

2.2.1 Zusammensetzung von interstellarem Staub und protoplanetaren Scheiben

Eine der wichtigen Fragen im Zusammenhang mit der Untersuchung magnetischer Aggregationsphänomene ist die nach der Zusammensetzung und den Eigenschaften von Stäuben im interstellaren Raum und in protoplanetaren Scheiben, denn aus diesen Stäuben sind die Objekte ursprünglich hervorgegangen.

Zur Bestimmung der Größenordnung der Partikel kann man einige Hinweise aus der Beobachtung von Sternenlicht gewinnen. Die interstellare Extinktion, also die Abschwächung des Lichtes beim Durchgang durch interstellare Materie ist abhängig von der Wellenlänge des Lichtes. Größere Partikel streuen Licht unabhängig von der Wellenlänge entsprechend ihrem geometrischen Querschnitt $\pi \cdot r_t^2$. Die Partikel, die die Extinktion aufgrund ihrer Streuung und Absorption hervorrufen, haben in der Regel einen sehr viel kleineren Radius als die Wellenlänge des beeinflussten Lichtes, sie streuen es proportional zu λ_L^4 (Unsöld und Baschek 1999). Somit können mit einer Messung der Extinktion in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlung Rückschlüsse auf die Korngrößen von interstellaren Stäuben gezogen werden, die die Strahlung auf ihrem Weg zum Beobachter passiert hat. Die Größe dieser Partikel liegt in der Regel im unteren Mikrometerbereich (Kerridge 1993).

Hauptbestandteil des ISM ist Gas, zu größten Teilen seien hier Wasserstoff und Helium genannt. Lediglich etwa 1% Prozent des ISM sind Staub, dessen weitere Zusammensetzung und Eigenschaften hier von Interesse sind. Es lassen sich auch Indizien für magnetische Komponenten im interstellaren Medium finden. Diese werden in Kapitel 2.3 näher erläutert. In Absorptionsspektren finden sich Hinweise auf unterschiedliche Elemente und Verbindungen im ISM zu denen auch Eisen gehört (Unsöld und Baschek 1999). Es ist davon auszugehen, daß sich aus der Zusammensetzung des ISM Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Staubkomponente im jungen Sonnensystem oder in beobachteten protoplanetaren Scheiben ziehen lassen, da sich diese Objekte aus dem ISM gebildet haben. Man kann jedoch nicht die Zusammensetzung des interstellaren Staubes direkt auf die Zusammensetzung des Staubes von Akkretionsscheiben abbilden, denn diverse Prozesse beeinflussen den Übergang des interstellaren Staubes in die Akkretionsscheibe (Gail 1998). Dennoch entstammt das Material von protoplanetaren Scheiben dem ISM und bietet somit Ansatzpunkte für die Verteilung der Staubkomponenten in Akkretionsscheiben (Kerridge 1993).

Beobachtungen (van den Ancker et al. 2000, Ferrarotti und Gail 2003) haben Spuren von eisenhaltigen Mineralien, insbesondere von verschiedenen Eisenoxiden sowohl in protoplanetaren Scheiben als auch in stellaren Winden aufgedeckt. Die Untersuchungen zeugen von Anteilen von bis zu einigen Millimeter großen Eisenoxidpartikeln in zirkumstellaren Scheiben. Eine genauere Beschreibung der Zusammensetzung von Staub in protoplanetaren Scheiben liefern Beckwith et al. (2000). Hauptbestandteile dieses Staubes sind demnach neben auch auf der Erde vorkommenden Mineralien wie Olivinen ($\text{Mg}_x \text{Fe}_{2-x} \text{SiO}_4$), Pyroxenen ($\text{Mg}_x \text{Fe}_{1-x} \text{SiO}_3$) und Quarzen (SiO_2) metallische Verbindungen wie elementares Eisen (Fe) und Troilit (FeS). Weiterhin treten noch Wassereis und Spuren von organischen Verbindungen auf.

Die chemische Zusammensetzung von kleineren und größeren Körpern in unserem Sonnensystem liefert Hinweise auf die Häufigkeitsverteilung von Materialien im jungen Sonnensystem. Dabei ist jedoch zu beachten, daß aufgrund des Temperaturgradienten im jungen Sonnensystem ein chemischer Gradient bei der Auskristallisierung vorlag. In der Nähe der Protosonne war die Temperatur aufgrund der höheren optischen Dicke und damit fehlender Möglichkeit, die gravitative Energie des Kollapses abzustrahlen, wesentlich höher als in einigen AE Entfernung. Das hat zur Folge, daß in der Nähe der Protosonne zunächst die Elemente und Verbindungen mit hohem Schmelzpunkt kondensierten, während leichter flüchtige Substanzen, wie zum Beispiel Wasser, erst in den äußeren Bereichen kondensieren konnten.

2.2.2 Zusammensetzung von Kometen, Asteroiden und Meteoriten

Seit langem wird das Material, aus dem Kometenkerne bestehen, als Urmaterial des Sonnensystems angesehen. Das heißt, die Kernsubstanzen - in der Regel Eis und andere Verbindungen, vor allem Kohlenstoff und Silikate - haben mehr oder weniger unverändert seit der Auskristallisierung aus dem Sonnennebel überlebt.

Beim Vorbeiflug der Sonden Giotto und Vega am Halleyschen Kometen im Jahr 1986 wurde während des Durchfluges der Raumsonden durch den Schweif dessen Zusammensetzung mit Hilfe von Massenspektrometern analysiert. Die Analyse der Daten der Giotto-Sonde ergab einen Anteil an potentiell magnetischen Mineralien wie zum Beispiel Nickel-Eisen, Magnetit und Phyrrotit von etwa 10 Prozent. Sie bilden eine nicht unerhebliche Fraktion von potentiell magnetischen Partikeln im jungen Sonnensystem (Schulze et al. 1997). Aktuelle Missionen zu kleinen Körpern im Sonnensystem, wie zum Beispiel die NASA-Mission Deep Impact oder die Rosetta-Mission der ESA haben unter anderem eine Analyse der Zusammensetzung von Kometenmaterial zum Ziel. Die Deep Impact Mission beobachtete den Einschlag des von ihr abgesetzten Impaktors auf dem Kometen Temple 1 mit ihren wissenschaftlichen Geräten im Juli 2005. Nach Auswertung der von ihr übermittelten Daten kann also bald auf neue Erkenntnisse über die Zusammensetzung von Kometen gehofft werden. Die Rosetta-Raumsonde dagegen wird ihr Ziel, den Kometen Churyumov-Gerasimenko, erst im Jahr 2014 erreichen, so daß Ergebnisse dieser Mission nicht in näherer Zeit zu erwarten sind.

Ebenso wie die Kometenzusammensetzung spiegelt die Zusammensetzung von Meteoriten ein recht genaues Abbild der Häufigkeitsverteilung von Mineralien im frühen Sonnensystem wider. Meteorite haben den Vorteil, daß sie nach ihrem Niedergang auf die Erdoberfläche zur direkten chemischen Untersuchung zur Verfügung stehen. Man unterscheidet mehrere Arten von Meteoriten, von denen die Eisenmeteorite – immerhin 6% der gefundenen Objekte – den höchsten Anteil von Eisen besitzen. Man kann diese Eisenmeteorite aufgrund ihrer Kristallstruktur aus Eisen und Nickel sehr gut von irdischen Eisenablagerungen unterscheiden (Unsöld und Baschek 1999). Diese Art von Meteoriten spricht also für einen erheblichen Anteil von Eisen und Nickel – also potentiell magnetischen⁵ Materialien – im frühen Sonnensystem.

Eine andere Art von Meteoriten, die Chondrite, enthält eingebettet in ihre Matrix kleine sphärische Partikel mit Größen im Millimeterbereich, die Chondren genannt werden. Entstehungstheorien dieser Chondren liefern eine Erklärung wie eine remanente Magnetisierung von Material im frühen Sonnensystem möglich ist: Man geht davon aus, daß zunächst gasförmiges Material im abkühlenden Sonnennebel in kleinen Tröpfchen innerhalb kurzer Zeit kondensiert ist. Diese kugelförmigen Chondren wurden später in eine Matrix aus anderen Mineralien eingebettet (Unsöld und Baschek 1999). Die Größe dieser Chondren geben Jones et al. (2000) zwischen 0,2 und 1 Millimeter an. Sie finden in der Zusammensetzung ferromagnetische Stoffe.

Durchläuft potentiell magnetisierbares Material einen Abkühlungsprozeß, so können interplanetare oder interstellare Magnetfelder remanent in die Strukturen eingefroren werden, sobald die Temperatur des Materials unter die Curietemperatur (siehe Kapitel 3.3.2) sinkt (Jones et al. 2000). Meibom et al. (1999) diskutieren die in einigen Chondriten gefundenen Eisen-Nickel-Körner, die aufgrund dieses Prozesses entstanden sein könnten. Es existierte also ein Mechanismus, der kleine magnetisierte Partikel entstehen ließ, denen möglicherweise ein entscheidender Anteil an der Entstehungsgeschichte von Planetesimalen und Kometesimalen zukommt.

2.2.3 Zusammensetzung von Planeten

Nicht zuletzt gibt die Zusammensetzung der Planeten bereits Hinweise auf die im jungen Sonnensystem vorherrschende Verteilung von Materialien, auch wenn während der vier Milliarden Jahre ihrer Existenz größere Mengen der flüchtigeren Substanzen durch Ausgasung und Sonnenwind verlorengegangen sind. Deutliche Hinweise liefert die Zusammensetzung der Erde.

Während die Erdkruste überwiegend aus Silikaten besteht, setzt sich der Erdkern zum größten Teil aus Eisen und anderen magnetischen Materialien zusammen, wie zum Beispiel Nickel mit Beimischungen von geringen Mengen Schwefel. Diese Separation ist durch das Absinken der schwereren Elemente während der Frühphase der Erdentstehung,

⁵Im folgenden wird der Begriff „magnetisch“ für Materialien verwendet, bei denen die Magnetisierung deutlich zu Tage tritt. Materialien, die ausschließlich dia- oder paramagnetisches Verhalten zeigen, werden in diesem Zusammenhang als „unmagnetisch“ angenommen.

als die Erde noch vollständig im flüssigen Zustand war, zu erklären. Der Massenanteil an potentiell magnetischen Materialien ist folglich relativ hoch (Unsöld und Baschek 1999).

Auch von einigen anderen Planeten ist die innere Zusammensetzung recht gut erforscht: Aus Messungen des Trägheitsmoments und der Gravitation wurden die inneren Dichteverteilungen und Zusammensetzungen bestimmt. Dabei fällt zum Beispiel der im Vergleich zum Erdkern prozentual erheblich größere Kern des Merkurs auf, dessen Untersuchung auf größere Mengen an schweren Elementen wie zum Beispiel Eisen schließen läßt (Lewis 1972). Zu den äußeren Planeten hin nimmt der Anteil von volatileren Elementen und Molekülen stetig zu.

2.2.4 Fragmentation und Kristallisation in protoplanetaren Scheiben

Während der Planetenbildung erreichte die Temperatur im Sonnensystem etwa in Entfernung der Merkurbahn Werte, bei denen Eisen und Nickel kondensieren. Andere Elemente verweilten zu diesem Zeitpunkt noch in der Gasphase. In äußeren, kälteren Gebieten konnten währenddessen leichter flüchtige Substanzen kondensieren, so daß die relative Häufigkeit von Eisen zu den äußeren Planeten hin abnimmt (Kartunnen et al. 1987). Als Beispiel für eine solche Verbindung sei hier Eisenoxid („Rost“) genannt, das trotz des hohen Eisenanteils auf dem Planeten Merkur eher selten ist, während der Mars zu großen Teilen damit bedeckt ist. Der Mars bildete sich in einem Gebiet, in dem die Temperatur des frühen Sonnenebels bei etwa 450 K lag. Die Kondensationstemperatur der meisten Metalloxide liegt im Temperaturbereich über 500 K, so daß diese hier eher kondensiert sind.

Als weiteres Beispiel ist die Kondensation von Wasser anzuführen, die in den äußeren Bereichen des frühen Sonnensystems wesentlich effektiver ablief, was zu einer erheblichen Erhöhung von flüssigem und festem Wasseranteil in den äußeren Regionen des Sonnensystems verglichen mit den inneren Regionen geführt hat (Lunine et al. 2000)

Während Cameron (1969) und Morfill et al. (1985) noch von monotonem Abfall der Temperatur als Funktion der Sonnenentfernung mit der Rate $T \approx r^{\frac{3}{4}}$ bis $r^{\frac{2}{3}}$ ausgehen, erweitert Boynton (1985) diese *thermische Fraktionierung* um kompliziertere Temperaturprofile aufgrund von Temperaturstabilisierungen durch Phasenübergänge und Turbulenzen im Sonnenebel. Abbildung 2.5 zeigt einen modellierten Temperaturverlauf einer protoplanetaren Scheibe.

2.3 Magnetfelder im Universum

Die Existenz von vielfältigen magnetischen Feldern im Universum kann als gesichert angesehen werden. Es existieren verschiedene Arten von Quellen, die Felder unterschiedlichster Intensitäten hervorrufen. Als Hinweis sei hier auf das Magnetfeld der Erde und

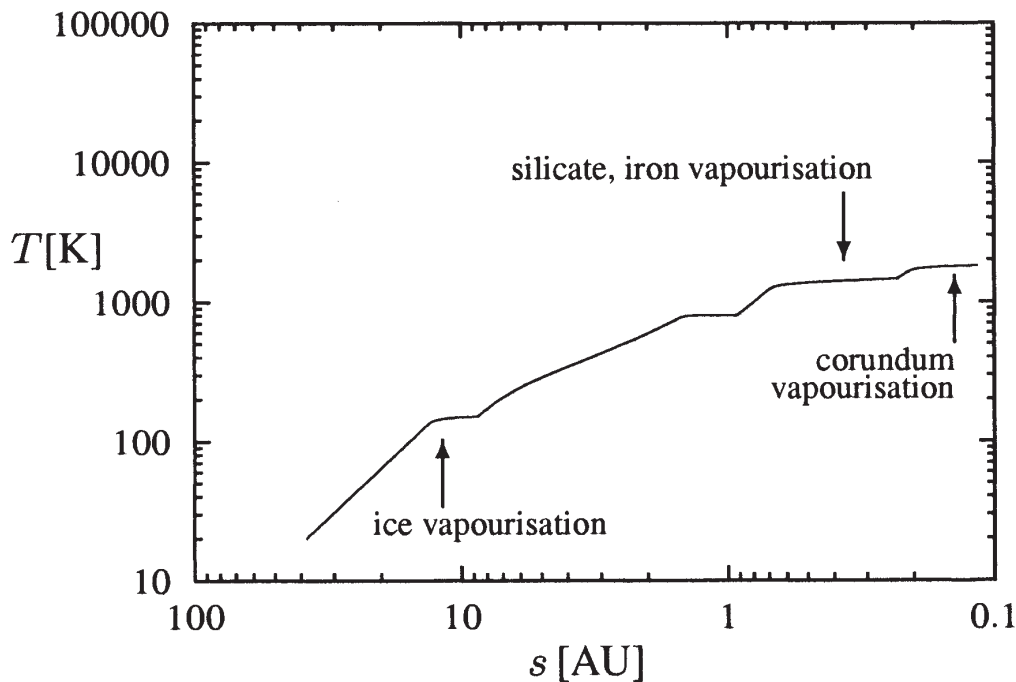


Abbildung 2.5: Temperaturverlauf in der Zentralebene von protoplanetaren Scheiben: Aufgetragen ist die Temperatur über dem solaren Abstand in Astronomischen Einheiten. Die Modellrechnung von Gail (1998) zeigt einen typischen Temperaturverlauf des Mediums in der Zentralebene einer protoplanetaren Scheibe. Für die Berechnung wurden Parameter verwendet, wie sie für die protoplanetare Scheiben der Sonne angenommen werden. Man erkennt den tendenziell ansteigenden Temperaturverlauf, der in Bereichen von Phasenübergängen stagniert (aus Gail 1998).

der Sonne verwiesen, die man im Stande ist direkt – entweder durch Bodenstationen oder mit Hilfe von Raumsonden – zu messen. Messungen von Magnetfeldern weit entfernter Objekte oder gar des interstellaren Raumes sind schwieriger. Dennoch ist es gelungen Magnetfelder von Objekten im Universum zu bestimmen.

2.3.1 Magnetfelder im interstellaren Raum

Chaisson und Vbra (1978) beschreiben zum Beispiel die Messung von Magnetfeldern in sogenannten Dunkelwolken⁶, die Quellen möglicher Planeten- und Sternentstehung sind. Die Größenbestimmung der Felder geschieht dabei durch Messung der Zeemanaufspaltung bestimmter Spektrallinien, deren Ursprung in der unterschiedlichen Ausrichtung des Elektronenspins der emittierenden Atome liegt. Diese Aufspaltung ist abhängig vom umgebenden Magnetfeld, so daß daraus ein Feld abgeschätzt werden kann. Chaisson und

⁶Dunkelwolken sind Gebiete am Sternenhimmel, die sich durch eine Abschwächung des Lichtes dahinterliegender Sterne bemerkbar machen. Insbesondere in der südlichen Milchstraße lassen sich solche Objekte bereits mit bloßem Auge erkennen. Sie bestehen aus interstellarem Staub, der neben der angesprochenen Extinktion auch Verfärbungen und Polarisation (näher erläutert in Kapitel 2.3) des sie durchquerenden Lichtes hervorrufen kann.

Vbra (1978) ermitteln Werte von bis zu 1000 nT^7 in einigen Dunkelwolken, in der Regel liegen die Werte jedoch eher bei $5\text{-}100 \text{ nT}$. Diese Methode beschränkt sich auf die Untersuchung von – nicht zwingend im sichtbaren Spektrum – selbstleuchtenden Objekten. Es wurden Zeemanaufspaltungen von Emissionslinien von molekularem Wasserstoff und OH-Radikalen gemessen, die im Umfeld der Dunkelwolken vorkommen, da diese in der Regel in sogenannten HII⁸ Regionen liegen.

2.3.2 Magnetfelder in protoplanetaren Scheiben

Die Existenz von Magnetfeldern im frühen Sonnennebel und auch in anderen protoplanetaren Scheiben wird als gesichert angesehen. Als Beleg für ein erhebliches Magnetfeld im frühen Sonnennebel gelten remanente Magnetisierungen, die in Meteoriten gemessen wurden (Levy und Sonett 1978). Quellen dieser Magnetfelder sind zunächst der junge Stern selber, sowie hydromagnetische Dynamoprozesse in den Gasmassen der ihn umgebenden rotierenden Akkretionsscheibe.

Levy (1978) berechnet die Größenordnung möglicher vorherrschender Magnetfelder im frühen Sonnennebel aus den angenommenen Parametern und Umgebungsbedingungen der Akkretionsscheibe. Dabei verwendet er Keplergeschwindigkeit⁹, Dichte und Skalenhöhe der Scheibe sowie die charakteristische Geschwindigkeit der turbulenten Bewegungen des Gases. Es ergeben sich Werte um $5 \cdot 10^5 \text{ nT}$. Werte in dieser Größenordnung sind notwendig, um die remanenten Magnetisierungen in Meteoriten zu erklären. Levy (1978) geht davon aus, daß durch die Bewegung von ionisierten Gasen in protoplanetaren Scheiben großräumige Magnetfelder von 10^5 bis 10^6 nT generiert werden können. Im Vergleich zum heutigen Magnetfeld der Erde liegen diese Felder um bis zu eine Größenordnung höher, gegenüber dem interplanetaren Magnetfeld von ca. 5 nT sogar um einige Größenordnungen.

2.3.3 Magnetisierung von Partikeln

Die Anwesenheit von magnetisierbaren Materialien im Sonnennebel wurde bereits diskutiert (vgl. Kapitel 2.2.1). Dort wurde ebenfalls die Temperaturverteilung in der Akkretionsscheibe und die daraus resultierende differentielle Kondensation von verschiedenen Materialien angesprochen. Mit den vorhandenen Magnetfeldern (siehe Kapitel 2.3.2) kann ein Mechanismus zur Entstehung von magnetisierten Partikeln beschrieben werden.

⁷Physikalisch korrekt müßte man bei der Angabe des Feldes in Tesla von der magnetischen Flußdichte oder Induktion B sprechen. Im folgenden wird der Begriff Feldstärke jedoch nicht für H , sondern für B verwendet.

⁸HII Regionen, die auch diffuse Nebel genannt werden, sind meist rötlich leuchtende Regionen am Sternenhimmel. In diesen Regionen wird Wasserstoffgas (H_2) von einem innenliegenden Objekt - zum Beispiel einem jungen Stern - zum Leuchten angeregt.

⁹Die Keplergeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der ein Objekt um einen Stern im Gleichgewicht rotiert. Dabei heben sich Gravitationskräfte und Fliehkräfte genau auf, so daß sich das Objekt auf einer stabilen Bahn bewegt.

Die gasförmigen Anteile an potentiell magnetischen Materialien kristallisieren aus und frieren das lokal vorhandene Magnetfeld remanent in ihre Struktur ein. Dieser von Levy und Sonett (1978) als *thermoremanente Magnetisierung* bezeichnete Prozeß kann eine Fraktion aus magnetischen Kleinstpartikeln generieren, die somit einen Beitrag zur Aggregation von Planetesimalen liefern können. Sind die Partikel klein genug, so entstehen Einbereichsteilchen (siehe dazu Kapitel 4.2). Im Gegensatz dazu beschreibt Levy (1978) auch einen von ihm als *viskose Magnetisierung* von Partikeln bezeichneten Prozeß, der unter isothermen Bedingungen das umgebende Magnetfeld in kleine potentiell magnetische Partikel remanent einbettet. Dieser Prozeß findet jedoch auf wesentlich längeren Zeitskalen statt und ist wesentlich weniger effizient als die *thermoremanente Magnetisierung*.

Hinweise für solche Prozesse liefern Magnetfeldmessungen an gefundenen Meteoriten. So wurde zum Beispiel an der Oberfläche des Allende-Meteoriten¹⁰ ein Magnetfeld von ca. 110.000 nT gemessen. Andere Messungen von Magnetisierungen von Chondren lassen Rückschlüsse auf die Stärke von Magnetfeldern im frühen Sonnensystem von 100.000 bis 700.000 nT zu (Jones et al. 2000). Es ist bei auf die Erdoberfläche gefallenen Objekten jedoch zu beachten, daß in den äußeren Schichten der Objekte, die beim Eintritt in die Erdatmosphäre aufgeschmolzen wurden, eine remanente Magnetisierung auftreten kann, die durch Einfrieren des Erdmagnetfeldes während des Abkühlens des Meteoriten zu erklären ist. Die Dicke dieser Schicht beträgt bis zu drei Zentimeter, so daß aussagekräftige Messungen der remanenten Meteoritenmagnetisierungen nur an größeren Objekten möglich sind.

Weitere Hinweise auf remanente Magnetisierung von Partikeln und damit auf magnetisierte Partikel im frühen Sonnensystem liefern auch aktuelle Satellitenmissionen. Zum Beispiel maß die Raumsonde Deep Space 1 beim Vorbeiflug an dem Asteroiden Braille im Jahre 1999 ein erhebliches Magnetfeld, das nach einhelliger Meinung nur auf eine remanente Magnetisierung des Asteroiden zurückzuführen ist (Richter et al. 2001). Aus den Meßwerten wurde das magnetische Feld an der Oberfläche des Asteroiden auf etwa 100.000 nT geschätzt. Bereits die Galileo-Mission zum Jupiter-System fand im Vorbeiflug an den Asteroiden Ida und Gaspra Magnetfelder, die nach Kivelson et al. (1993) auch auf remanente Magnetisierungen in den Asteroiden zurückzuführen sind. Berechnungen des magnetischen Momentes von Gaspra aus den gemessenen Feldwerten lassen auf ein um acht Größenordnungen schwächeres Moment als das magnetische Moment der Erde schließen. Somit wäre an der Oberfläche von Gaspra ein magnetisches Feld von bis zu 100.000 nT meßbar (Kivelson et al. 1993).

¹⁰Der Allende-Meteorit ist 1969 in Mexiko niedergegangen. Es handelt sich bei ihm um einen kohligen Chondriten (s.o.).

2.3.4 Polarisierung von Sternenlicht und Ausrichtung interstellarer Partikel

Das Licht von Sternen erscheint dem Beobachter auf der Erde meist linear polarisiert (Raith 1997). Diese Polarisation wurde von Hall (1949) und Hiltner (1949) entdeckt und gab zunächst Rätsel auf. Inzwischen geht man davon aus, daß das Licht dieser Sterne auf seinem Weg Wolken aus interstellarem Staub durchquert. Hinweise auf diese Wolken liefert die interstellare Verfärbung und Extinktion des Lichtes (Weintraub et al. 2000). Bestehen diese Staubwolken nun aus linearen oder scheibenförmigen Partikeln und sind diese angereichert mit potentiell magnetischen Materialien, so können sie sich am interstellaren Magnetfeld ausrichten. Parallel an den magnetischen Feldlinien ausgerichtet, wirken die Teilchen wie ein Polarisationsfilter (Unsöld und Baschek 1999).

Betrachtet man nun die Richtung der Polarisation, so fällt auf, daß das Licht vieler untersuchter Sterne in Richtung der galaktischen Ebene polarisiert ist (Unsöld und Baschek 1999). Mit Hilfe dieser Information kann nicht nur auf das Vorhandensein von magnetischen Partikeln im interstellaren Staub geschlossen werden, sondern auch die Größenordnung und die Richtung des interstellaren Magnetfeldes abgeschätzt werden. Man geht von Werten um 1 nT aus. Auf kleineren Skalen läßt sich mit Hilfe der Polarisationsrichtung die räumliche Ausrichtung von protoplanetaren Scheiben bestimmen, wenn man die Annahme macht, daß der Protostern ein überwiegend poloidales Dipolfeld hat (Weintraub et al. 2000).

2.4 Mechanismen der Koagulation und Aggregation

Im Gegensatz zu den bereits beschriebenen Vorgängen spielen sich Aggregationsvorgänge auf wesentlich kleineren Skalen ab. Bis in die neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts war die Annahme verbreitet, daß im frühen Sonnennebel gravitative Instabilitäten die Keimzellen für das Wachstum von Planetesimalen waren, so daß eine Untersuchung von Koagulationsvorgängen auf mikroskopischer Ebene im Zusammenhang mit Planetenentstehung zunächst nicht notwendig erschien. Doch fragte Weidenschilling (1995) provokativ „Can Gravitational Instability Form Planetesimals?“ und verneinte diese Möglichkeit. Nun wurde begonnen, andere Mechanismen für das Wachstum von Planetesimalen zu suchen. Die Koagulation von Kleinstpartikeln bietet hier eine Möglichkeit, aus den Staubmassen größere Objekte heranwachsen zu lassen, bis die Wirkung der Gravitation zu dominieren beginnt.

Bei den Mechanismen des Wachstums von Kleinstpartikeln spielen mikroskopische Effekte wie zum Beispiel Van-der-Waals-Kräfte, Oberflächenladungen und Magnetisierungen der Partikel eine größere Rolle. Blum (2006) bietet eine weite Übersicht über die Vorgänge während der Agglomeration von Kleinstpartikeln, die in den folgenden Abschnitten näher beleuchtet werden.

2.4.1 Koagulation von Mikrometerpartikeln

Die Koagulation basiert auf dem Stoß der mitwirkenden Partikel und ihrer Haftung aneinander. Da solche Vorgänge nicht nur für das Wachstum von Planetesimalen von Bedeutung sind, wurden auf dem Gebiet der Partikelhaftung bereits mehrere wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt. Wichtige Anwendungsbereiche dieser Forschungen sind zum Beispiel die Haft- und Stoßwahrscheinlichkeiten von verunreinigenden Kleinstpartikeln auf Oberflächen. In diesem Zusammenhang wurden auch Untersuchungen und Betrachtungen zur elektrostatischen Aufladung von Kleinstpartikeln durch Reibungseffekte durchgeführt, die aber für unsere Experimente von untergeordnetem Interesse sind und an anderer Stelle diskutiert werden (Poppe et al. 2000a).

Die meisten Untersuchungen und Modellierungen von Koagulationsvorgängen werden mit Hilfe von idealisierten Teilchen durchgeführt. In der Regel wurden bei diesen Versuchen kleine, sphärische Partikel für die Experimente verwendet, da sich bei diesen die Kontakt- und Bewegungsphänomene einfacher beschreiben und simulieren lassen. Dennoch ist die Bedeutung von unregelmäßigen Partikeln erheblich, da bei ihnen zusätzliche Phänomene auftreten, die für die Koagulationsprozesse von erheblicher Bedeutung sind (Poppe 1998).

Die Haftgrenzgeschwindigkeit v_c ist ein die Haftung nach Stößen kleiner Partikel beeinflussender Parameter. Dies ist die Maximalgeschwindigkeit, bei der Partikel nach einem Stoß noch aneinander haften bleiben. Zu dieser Haftgrenzgeschwindigkeit existieren mehrere Modelle und Experimente (Dahneke 1971, Johnson et al. 1971, Tsai et al. 1992, Chokshi et al. 1993, Heim et al. 1999), die an anderer Stelle näher erläutert werden (Poppe 1998). Liegt die Anfluggeschwindigkeit v über der Haftgrenzgeschwindigkeit v_c dann können die beiden Partikel im Kollisionsfalle kaum aneinander haften bleiben, die Haftwahrscheinlichkeit der Partikel nimmt gegenüber langsameren Partikeln stark ab. Dies limitiert haftende Teilchenstöße auf einen Teil des Geschwindigkeitspektrums. Für die Haftgrenzgeschwindigkeit geben Heim et al. (1999) die Formel

$$v_c = 1,07 \frac{\gamma_o^{\frac{5}{6}}}{E^{\frac{1}{3}} R^{\frac{5}{6}} \rho^{\frac{1}{2}}} \quad (2.2)$$

an, wobei γ_o die Oberflächenenergie pro Fläche, E das Elastizitätsmodul, ρ die Dichte der Partikel und $R = r_1 \cdot r_2 / (r_1 + r_2)$ der reduzierte Radius der Kugeln mit den Radien r_1 und r_2 ist. Für verschiedene Materialien, Formen, Oberflächenstrukturen und Targetmaterialien wurden unterschiedliche Haftgrenzgeschwindigkeiten ermittelt. Diese liegen alle im Bereich von einigen Metern pro Sekunde. Experimentell hat man Werte von 1,1 bis 2,3 m/s für Quarzglaskugeln auf verschiedenen Targets beziehungsweise zwischen 2,3 und 53 m/s für andere, teilweise unregelmäßig geformte Partikel ermittelt (Poppe 1998). Damit sind Koagulationsvorgänge zwischen Kleinstpartikeln auf diesen Geschwindigkeitsbereich limitiert.

Ein weiterer wichtiger Parameter für Aggregationsvorgänge ist der Wirkungsquerschnitt, der bereits in dem oben erwähnten reduzierten Radius R enthalten ist. Partikel, die koagulieren sollen, müssen einander zunächst begegnen, und je größer sie sind, desto höher

ist die Chance, daß sie aufeinander treffen. Der Wirkungsquerschnitt ist insbesondere bei der magnetischen Aggregation von erheblicher Bedeutung (vgl. Kapitel 2.4.3).

In der Regel werden bei der Aggregation von Partikeln im frühen Sonnenebel nicht nur Partikel-Partikel-Stöße, sondern auch Stöße von Partikeln mit bereits aggregierten Teilchen und Stöße zwischen Aggregaten untereinander stattfinden. Bei diesen Vorgängen spielen weitere Parameter eine entscheidende Rolle: Bei den Partikel-Aggregat-Stößen kann es neben der Anlagerung der Partikel an das Aggregat unterhalb einer bestimmten Haftgrenzgeschwindigkeit auch zu Restrukturierung des Aggregates kommen (Blum und Wurm 2000). Bei diesen Stößen können einschlagende Partikel die Struktur eines Aggregates bei entsprechender Einschlaggeschwindigkeit und damit entsprechendem Energieübertrag neu ordnen oder gar vollständig zerstören. Eben solche Vorgänge sind bei Stößen von Aggregaten untereinander möglich. Diese Vorgänge sind experimentell beobachtet worden (Blum und Wurm 2000), spielen für die geplanten Experimente aber eine untergeordnete Rolle, da diese Vorgänge auf längeren Zeitskalen stattfinden, die uns zur experimentellen Aggregation nicht zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 3.2).

Daß unregelmäßig geformte Partikel beim Stoßen eine höhere Haftwahrscheinlichkeit und damit auch eine höhere Haftgrenzgeschwindigkeit aufweisen (Poppe et al. 2000b), läßt darauf schließen, daß Form und Oberfläche von Partikeln bei den Koagulationsvorgängen durchaus eine Rolle spielen. In diesem Zusammenhang sind weitere Prozesse beim Stoßen der Teilchen möglich und von Bedeutung: Kugelförmige Partikel sind in der Lage, „umeinander“ zu rollen, was eine Umstrukturierung der Aggregate während des Stoßes vereinfacht (Dominik und Tielens 1995, 1996, 1997, Heim et al. 1999). Weiterhin ist es unter bestimmten Bedingungen möglich, daß Partikel an den Haftstellen rotieren, gleiten oder gar abreißen. Für die Kraft, die notwendig ist, um koagulierte sphärische Silikatpartikel voneinander zu trennen, wurden experimentell ≈ 100 nN ermittelt (Heim et al. 1999).

2.4.2 Fraktales Wachstum

Unter realen Bedingungen treten nicht nur, wie im letzten Abschnitt beschrieben, Stöße von Einzelpartikeln auf, sondern auch Stöße von Partikeln mit bereits koagulierten Partikelgruppen, also Aggregaten, oder von Aggregaten mit anderen Aggregaten auf. Dabei entstehen keine räumlich kompakten Gebilde, sondern meist äußerst filigrane Netz- und kettenartige Strukturen. Diese Strukturen weisen eine hohe *Selbstähnlichkeit* auf und lassen sich mathematisch mit dem Konzept der *fraktalen Dimension*¹¹ D_f beschreiben (Mandelbrot 1982, Meakin und Donn 1991). Die Dimension solcher Strukturen läßt sich nicht mehr mit einem ganzzahligen Wert beschreiben. Man spricht deshalb von sogenannten fraktalen Aggregaten.

¹¹Als bekanntestes Beispiel für die *fraktale Dimension* läßt sich hier die Vermessung einer Küstenlinie angeben: Je näher man die Küstenlinie betrachtet, desto größer fällt die Messung ihrer Länge aus. Dabei kann die Küstenlinie in verschiedenen „Vergrößerungen“ selbstähnliche Strukturen aufweisen. Die Küstenlinie verliert somit mathematisch ihre Linearität und ihre Dimension läßt sich als zwischen einer Linie (1) und einer Fläche (2) betrachten.

Mathematisch gesehen ist es möglich mit Hilfe der *fraktalen Dimension* eines Objektes aus seiner typischen räumlichen Ausdehnung auf weitere Eigenschaften, wie zum Beispiel seine Masse zu schließen. So läßt sich der Zusammenhang zwischen der Masse eines Aggregates der Länge r_a mit Hilfe von D_f wie folgt angeben.

$$m_a \sim r_a^{D_f} \quad (2.3)$$

Als typische räumliche Ausdehnung kann neben dem Radius r_t eines kugelförmigen Einzelpartikels oder der Länge einer Kette r_a für fraktale Aggregate der sogenannte *Gyrationsradius* angegeben werden. Er ist proportional zum Radius eines kugelförmigen Teilchens, das das gleiche Trägheitsmoment wie das Aggregat besitzt. Für ein Aggregat aus n Partikeln der Masse m_i und dem Abstand r_i vom Massenmittelpunkt des Aggregates kann er mit der Formel

$$R_{gyr} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n m_i r_i^2}{\sum_{i=1}^n m_i}} \quad (2.4)$$

berechnet werden.

Es hat sich gezeigt, daß Aggregate aus Partikeln unterschiedlicher Magnetisierung deutliche Variationen in der *fraktalen Dimension* aufweisen. Während Experimente zum Wachstum von nichtmagnetischen Partikeln Strukturen mit *fraktalen Dimensionen* um zwei liefern, werden bei Koagulationsexperimenten mit magnetischen Partikeln Strukturen mit niedrigeren *fraktalen Dimensionen* erwartet und auch gefunden. Nübold (2001) hat bei den Koagulationsexperimenten von Barium-Ferrit-Partikeln mit Größen um 1 μm fraktale Strukturen mit Dimensionen um 1,02 und 1,33 gefunden. Helgesen et al. (1988) ermitteln Werte von $D_f \approx 1,2$ für die Aggregation von magnetischen Partikeln mit einem Durchmesser von 3,5 μm . Bei anliegendem externen Störfeld, welches eine Ausrichtung der gewachsenen Aggregate erwarten läßt, finden sie sogar Werte um $D_f \approx 1$. Für die Koagulation von nichtmagnetischen Partikeln wurden auf theoretischem und experimentellem Wege Strukturen mit *fraktalen Dimensionen* $D_f \approx 1,8 - 2,1$ beobachtet (Weidenschilling et al. 1989, Kempf 1997, Wurm 1997, Wurm und Blum 1998).

2.4.3 Aggregation mit magnetischen Kräften

Magnetischer Wirkungsquerschnitt

Bei der Koagulation von Partikeln stellt sich der Wirkungsquerschnitt σ der Partikel als wichtige Einflußgröße heraus. Bei nichtmagnetischen Teilchen ist dies in der Regel der geometrische Querschnitt der Partikel, also

$$\sigma = 4 \cdot \pi \cdot r_t^2. \quad (2.5)$$

Dieser Wirkungsquerschnitt ist gegenüber einem rein geometrisch ermittelten Wirkungsquerschnitt um den Faktor vier größer, da hier auch nicht-zentrale Stöße – zum Beispiel streifende Stöße – berücksichtigt werden.

Magnetische Partikel verhalten sich bezüglich des Wirkungsquerschnitts aufgrund der Kräfte zwischen ihren magnetischen Dipolen anders. Man definiert einen magnetischen Wirkungsquerschnitt σ_m . Experimentelle Untersuchungen (Nuth et al. 1994) und Ergebnisse von Simulationen (Nübold und Glassmeier 1999, 2000) lieferten Werte für den magnetischen Wirkungsquerschnitt von kleinen, sphärischen Eisenpartikeln. Dabei wurde ein Verhältnis von

$$100 < \frac{\sigma_m}{\sigma} < 2000 \quad (2.6)$$

in Abhängigkeit von der Partikelgeschwindigkeit v_t gefunden. Insbesondere bei Geschwindigkeiten unterhalb der thermischen Geschwindigkeit $v_{th} = (k_B T / m_t)^{1/2}$ nimmt der magnetische Wirkungsquerschnitt stark zu. Die Werte für den magnetischen Wirkungsquerschnitt liegen mit zwei bis drei Größenordnungen deutlich über dem geometrischen Wirkungsquerschnitt. Da der Wirkungsquerschnitt direkt in die Stoßwahrscheinlichkeit eingeht, ist bei magnetischen Partikeln eine deutlich höhere Stoß- und Koagulationsrate möglich.

Stabilität der Aggregate

Aggregate, die aus magnetischen Partikeln bestehen, deren magnetische Momente in Linie ausgerichtet sind, haben gegenüber unmagnetischen Aggregaten zusätzliche magnetische Kräfte, die einer Veränderung ihrer Struktur entgegen wirken (vgl. Kapitel 2.4.1). Neben diesem Effekt haben Untersuchungen (Jacobs und Bean 1955) allerdings gezeigt, daß lineare magnetische Strukturen mit mehr als vier dipolaren Komponenten als energetisch stabilste Konfiguration geschlossene Strukturen bilden, wie zum Beispiel Ringe oder Klumpen. Die Umstrukturierung der linearen Objekte erfordert jedoch Energie, um die Anordnung aus ihrem metastabilen Gleichgewicht zu bringen. Nübold (2001) führt an, daß die mechanischen Widerstände gegen eine solche Umstrukturierung dazu ausreichen, die lineare Anordnung der Komponenten auch bei längeren Ketten zu erhalten.

Aggregatmagnetisierung

Von Nübold und Glassmeier (2000) wurden Simulationen und Untersuchungen angestellt, um das resultierende magnetische Moment eines gewachsenen Aggregates zu bestimmen. Dabei wird aus Einzelpartikeln mit dem magnetische Moment μ_t ein Aggregat aufgebaut, das ebenfalls ein magnetisches Moment hat. Dieser Vorgang wurde von Nübold und Glassmeier (2000) als *Akkretionsremanenz* bezeichnet. Normalerweise ist davon auszugehen, daß das Wachstum von Aggregaten aus magnetischen Partikeln so abläuft, daß die Dipole sich mit gegensätzlicher Polanordnung aneinanderlagern. Dabei entstehen in der Regel lineare, kettenförmige Strukturen (vgl. Kapitel 2.4.2), bei denen die Kontaktstellen

der Aggregate jeweils magnetischer Nord- und Südpol sind. Bei geometrisch und magnetisch linear angeordneten Partikeln würde sich für ein Aggregat aus n Partikeln mit dem jeweiligen magnetischen Moment μ_i das resultierende magnetische Moment des kompletten Aggregates

$$\mu_a = \sum_{i=1}^n \mu_i = n \cdot \mu_t \quad (2.7)$$

ergeben. Jedoch findet das Wachstum in der Realität nicht so ideal statt. Thermische Bewegung und andere Faktoren behindern das genaue Ausrichten der einzelnen Partikel im Aggregat und auch die Bildung einer ideal linearen Kette. Nübold und Glassmeier (2000) finden für das magnetische Moment eines kettenförmig gewachsenen Aggregates den Wert

$$\mu_a = \mu_t \cdot n^{0,63}. \quad (2.8)$$

Das Wachstum des magnetischen Momentes des Aggregates ist also nicht linear, sondern durch nicht perfekte Ausrichtung der Dipolmomente der anlagernden Partikel abgeschwächt.

2.4.4 Staubaggregation im Sonnennebel und in protoplanetaren Scheiben

Im Gegensatz zu den beschriebenen Vorgängen der Staubkoagulation verschiedener Materialien unter experimentellen Bedingungen finden die realen Vorgänge in protoplanetaren Scheiben unter komplizierten Umgebungsbedingungen statt. Die Aggregatbildung spielt sich in völlig anderen Maßstäben und in wesentlich größeren Dimensionen ab, als mit Labormitteln simuliert werden kann. Durchmesser von protoplanetaren Scheibe können bis zu 100 AE betragen.

In der zentralen Scheibe rotiert der Staub mit Keplergeschwindigkeit, während das Gas zusätzliche Kräfte durch den Druckgradienten erfährt und deshalb langsamer rotiert. Dieser Geschwindigkeitsunterschied führt dazu, daß die Partikel gegenüber dem Gas eine Art „Fahrtwind“ erfahren, der sie aufgrund von Reibungseffekten abbremst und damit auf niedrigere Bahnen um den Stern zwingt. Die Relativbewegung zwischen Gas und Staub führt dazu, daß der Staub nach einiger Zeit an die Bewegung des Gases ankoppelt. Die Zeit, in der dies passiert, wird Ankoppelzeit t_e genannt und ist sowohl von der Größe der Staubpartikel als auch von der Dichte der Partikel abhängig (Weidenschilling und Cuzzi 1993). Dabei benötigen kleine und weniger dichte Partikel weniger Zeit als größere und dichtere Teilchen. Für Partikelmassen um 10^{-15} kg liegt die Ankoppelzeit bei etwa 1 s. Bei Objekten, deren Ankoppelzeit wesentlich größer ist als die inverse Keplerfrequenz

$$t_e \gg \frac{1}{\Omega} = \sqrt{\frac{r^3}{\gamma M_\odot}}, \quad (2.9)$$

verliert die Ankoppelung an das Gas entscheidend an Bedeutung, so daß sie sich durch ihre Ausmaße und Masse wieder auf Keplerbahnen bewegen.

Durch diese Mechanismen erhält man zwischen den einzelnen Partikeln und Aggregaten Relativgeschwindigkeiten, die erst ihr gegenseitiges Stoßen und damit die Koagulation ohne magnetische oder elektrostatische Kräfte ermöglichen.

2.5 Offene Fragen

Wie beschrieben wurde, sind die generellen Prozesse, die zur Entstehung von Planetensystemen in Akkretionsscheiben führen, weitgehend geklärt (Kapitel 2.1). Ebenso sind die Prozesse der vorgravitativen Bildung von Planetesimalen und Kometesimalen aus unmagnetischen Partikeln näher untersucht worden (Kapitel 2.4). Die Bedeutung von magnetischen Partikeln während der Entwicklungsphase und deren Beitrag zur Entstehung der Körper im Sonnensystem sind bisher weitgehend nicht betrachtet worden. Ebenso wurde der Einfluß prä- und frühsolarer Magnetfelder auf die Entwicklungsgeschichte der Akkretionsscheiben und den Akkretionsprozeß der Körper im Sonnensystem bisher nicht näher untersucht.

Die Existenz einer Fraktion potentiell magnetisierbarer Materie (Kapitel 2.2.1) und auch einer Möglichkeit, diese dauerhaft zu magnetisieren (Kapitel 2.3) verdeutlicht jedoch, daß diese magnetischen Partikel einen Anteil an der Entstehung von Planeten haben könnten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, den Einfluß von magnetischen Partikeln und externen magnetischen Feldern auf diese Partikel in Aggregationsprozessen näher zu betrachten. Die experimentellen Untersuchungen, die bereits Nübold (2001) durchgeführt hat, sollen nun in dieser Arbeit vertieft und um die Untersuchung des Einflusses externer Magnetfelder erweitert werden.

3 Experimentelle Voraussetzungen für Aggregationsversuche

Die experimentelle Untersuchung der in Kapitel 2.1 und Kapitel 2.4.1 beschriebenen Mechanismen und Vorgänge der Planetenentstehung in jungen Sternensystemen erfordert die Herstellung von Bedingungen, die denen in protoplanetaren Scheiben kurz nach der Entstehung eines neuen Sterns ähneln. Insbesondere sind hierbei die geringe Dichte des Mediums aus Gas und Staub und die vorherrschenden Kräfte, Gravitation und Wechselwirkungskräfte des Gases mit dem Staub, und die daraus resultierenden Bewegungen, Keplerbewegungen, Brownsche Bewegungen und turbulente Bewegungen in der Staubscheibe zu beachten. Für die geplanten magnetischen Aggregationsexperimente sind darüber hinaus die magnetischen Umgebungsbedingungen von erheblicher Bedeutung.

3.1 Vakuum

Die Dichte des Gasmediums in protoplanetaren Scheiben ist sehr gering und liegt im Abstand von einigen Astronomischen Einheiten vom Protostern bei Werten um $\cdot 10^{-10}$ g cm^{-3} (Levy 1978, Weidenschilling und Cuzzi 1993). Somit herrschen in protoplanetaren Scheiben äußerst geringe Drücke. Technisch gesehen lassen sich derart niedrige Drücke nur mit extrem hohem Aufwand experimentell verwirklichen. Dennoch ist es möglich, sinnvolle Aggregationsexperimente unter höherem Umgebungsdruck durchzuführen. Wichtig ist dabei, daß man sich in einem Regime mit freier molekularer Strömung befindet (Weidenschilling und Cuzzi 1993). Das heißt, die mittlere freie Weglänge der Moleküle λ_t muß erheblich größer sein, als die räumlichen Ausmaße der Aggregate r_a . Dies ist der Fall, wenn sich aus den Versuchsbedingungen – unter anderem Umgebungsdruck p und Teilchenparameter – Knudsenzahlen Kn größer 1 ergeben:

$$Kn = \frac{\lambda_t}{r_a} = \frac{k_B T}{4\sqrt{2}\pi \cdot r_g^2 \cdot p \cdot r_a} \quad (3.1)$$

Hierbei ist r_g der Radius der Moleküle des umgebenden Gases. In Abbildung 3.1 kann man erkennen, daß selbst sehr große Aggregate von über 100 μm Länge nur bei Drücken über 10 hPa in den Bereich kommen, in denen sie hydrodynamischen Effekten ausgesetzt sind.

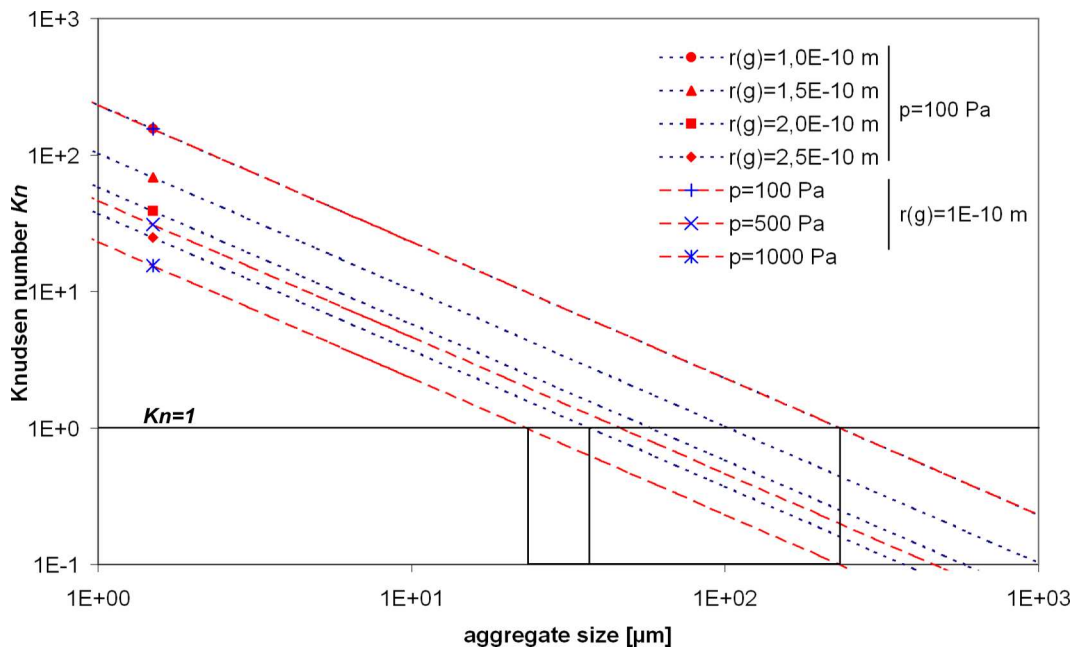


Abbildung 3.1: Knudsenzahlen: Aufgetragen ist die Knudsenzahl über der Größe von Aggregaten. Die einzelnen Kurven repräsentieren verschiedene Radien der umgebenden Gaspartikel $r(g)$ (rote Symbole) bei konstantem Druck von 100 Pa, bzw. verschiedene Drücke des umgebenden Gases bei konstantem Gaspartikelradius von $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ (blaue Symbole). Für $Kn > 1$ liegt freie molekulare Strömung vor. Wie man erkennen kann, liegt bei Gasradien von ca. $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ (Luft: $1,87 \cdot 10^{-10} \text{ m}$) für Aggregate aus bis zu 100 Partikeln freie molekulare Strömung vor.

Wie wir in Kapitel 5.1 sehen werden, liegen die erreichbaren Drücke während der Experimentdurchführung deutlich unter 10 hPa, so daß eine freie molekulare Strömung selbst größerer Aggregate möglich ist.

3.2 Mikrogravitation

Für die Umsetzung der erforderlichen Bedingungen im Experiment, um die Sedimentation des für den Versuch verwendeten Staubes zu verhindern, existieren verschiedene technische Möglichkeiten. Je nach System ist dabei allerdings keine absolute Schwerelosigkeit, sondern eine Restgravitation zwischen $5 \cdot 10^{-2}g$ und $1 \cdot 10^{-5}g$ zu erreichen. Man spricht deshalb im Allgemeinen von Mikrogravitation.

Die Anforderungen an die Mikrogravitation während der Experimente wird durch die Ausmaße des Versuchsraum und die Dauer des Versuchs definiert. Da die Partikel während der Versuchsdauer frei schwebend aggregieren sollen, sind die auf sie wirkenden Beschleunigungen während des Versuchs darauf zu beschränken, daß sie den Versuchsraum – die in Kapitel 5.1.1 näher beschriebene Vakuumkammer mit einem Durchmesser von 10 cm – nicht verlassen. Die technischen Möglichkeiten von Mikrogravitationssysteme-

men und Aufbauten zur Durchführung von Experimenten in Mikrogravitation – Levitationstrommel, Fallturm, Höhenforschungsraketen, Parabelflüge und der Orbit – werden im Folgenden erörtert.

3.2.1 Levitationstrommel

Eine relativ einfache Möglichkeit, den Effekt der Staubsedimentation ohne Mikrogravitation zu verhindern, ist die sogenannte Levitationstrommel. Bei diesem Verfahren wird eine mit einem Restgas gefüllte Trommel in Rotation versetzt. Durch Ankoppelung der Rotationsbewegung der Trommel an das enthaltene Gas wird dieses mit in Rotation versetzt. Rotiert das Gas, werden die Partikel in die Trommel injiziert. Bei geeigneten Größen- und Druckverhältnissen können die eingebrachten Partikel aufgrund von Reibungseffekten mit dem rotierenden Gas an dieses ankoppeln und zu rotieren beginnen. Auf der aufstrebenden Seite der Rotationsbewegung – also auf der Seite der Trommel, auf der das Restgas entgegen der Erdbeschleunigung rotiert - können nun Teilchen auf Kreisbahnen gefangen werden. Abbildung 3.2 verdeutlicht das Prinzip.

Die Kreisbahnen, auf denen die gefangenen Partikel um ihre Gleichgewichtspunkte rotieren, haben unterschiedliche Radien. Aufgrund dieser Variation der Radien ist es möglich, daß sich Partikel stoßen und dabei aggregieren. Es handelt sich also hierbei nicht um *echte Mikrogravitation*, sondern nur um eine Simulation von ähnlichen Bedingungen. Die Aerodynamik in der Levitationstrommel weicht deutlich von den Bedingungen in protoplanetaren Scheiben ab, da der nötige Druck des Restgases je nach Partikelparametern – je größer und schwerer die Partikel, desto höher der Druck – mit 1 bis 10 hPa relativ hoch sein muß, um eine gute Ankoppelung der Partikel an die Gasströmung zu ermöglichen. Es kann über die Drehzahl der Trommel Einfluß auf diese Parameter genommen werden. Um den Umgebungsdruck vermindern zu können, ist eine Erhöhung der Drehzahl notwendig, was schnell an die Grenzen der technischen Machbarkeit führt. Weiterhin sind die Partikel wesentlich in ihrer Bewegungsfähigkeit eingeschränkt und führen Kreisbewegungen aus.

3.2.2 Fallturm

Als bodengestütztes System liefert ein Fallturm mit Werten unter $10^{-5}g$ Mikrogravitationsbedingungen von hoher Qualität. In einer Röhre, die zur Verhinderung von Reibung evakuiert ist, wird eine sogenannte Fallkapsel zu Boden fallen gelassen und durch das Gravitationsfeld der Erde beschleunigt. Im Inneren der Kapsel herrscht während des Falls Mikrogravitation. Die Höhe des Fallturms limitiert die Dauer der experimentell nutzbaren Fallzeit. Diese Zeit ergibt sich zu

$$t_f = \sqrt{\frac{2s}{g}}. \quad (3.2)$$

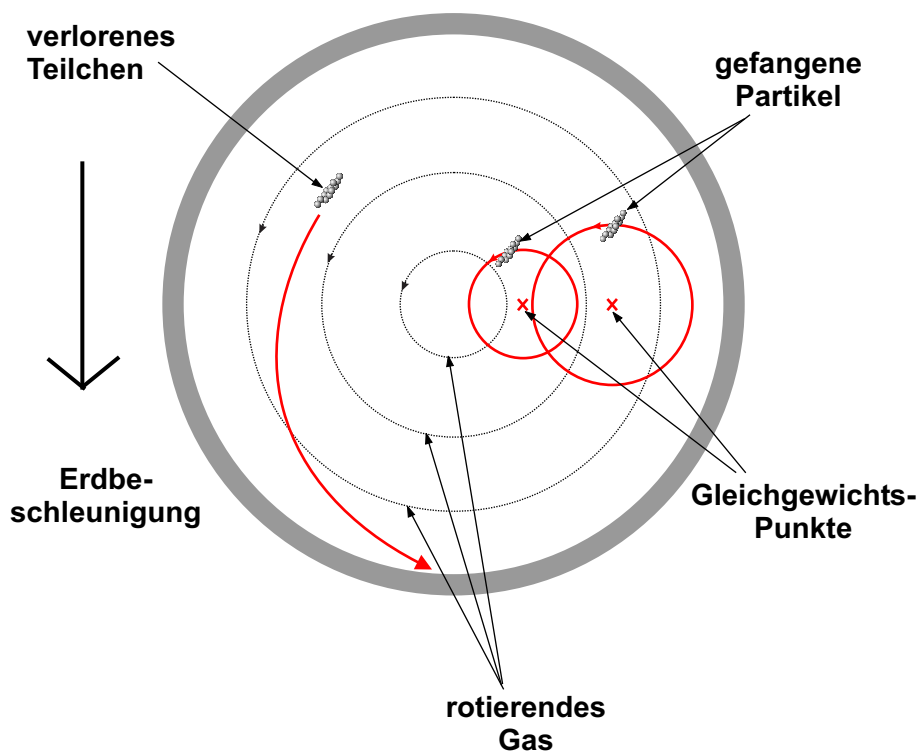


Abbildung 3.2: Funktionsprinzip der Levitationstrommel: Das rotierende Restgas nimmt aufgrund von Reibungseffekten mit den Partikeln diese mit und zwingt sie auf Kreisbahnen um ihre Gleichgewichtspunkte. Auf der aufstrebenden Seite der Gasströmung wirkt diese Reibungskraft gegen die Schwerkraft und zwingt die Partikel auf Kreisbahnen verschiedener Radien.

Damit ergibt sich, am Beispiel des Fallturms des ZARM¹ in Bremen, der eine (Fall-)Höhe von 120 Metern hat, eine Fallzeit von 4,74 Sekunden (ZARM 2005). Mit technischen Maßnahmen läßt sich diese Zeit noch verlängern. So wurde im Jahre 2004 ein Katapultmechanismus im Fallturm des ZARM integriert, der die Kapsel von unten nach oben schleudert, so daß die experimentell nutzbare Zeit auf 9,48 Sekunden verdoppelt werden kann. Kleinere Falltürme kommen auf entsprechend kürzere Mikrogravitationsphasen, größere Türme sind aufgrund der nötigen Höhe nur sehr aufwendig zu verwirklichen.

Der guten Qualität der Mikrogravitation steht ein anderer Nachteil als bei der Levitationstrommel entgegen: Das durchzuführende Experiment muß in die räumlich begrenzte Fallkapsel mit einer Höhe von 240 cm und einem Durchmesser von 80 cm integriert werden, somit werden voluminösere Versuchsaufbauten ausgeschlossen. Weiterhin ist es notwendig die durchzuführenden Experimente vollständig zu automatisieren. Manuelle Eingriffe während der Experimente sind nicht möglich.

Sowohl der Aufwand zur Integration eines Experiments in eine Fallturm-kapsel als auch der Zeitaufwand zur Evakuierung der Fallröhre sind hoch, so daß im Falle des Fallturms des ZARM in Bremen einer mehrwöchigen Integrationsphase maximal drei Abwürfe pro

¹Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation

Tag folgen. Dabei werden meistens drei verschiedene Experimente am Tag durchgeführt, so daß je Versuch ein Fallexperiment am Tag durchgeführt werden kann.

3.2.3 Höhenforschungsraketen

Wesentlich längere Mikrogravitationszeiten erreicht man mit Höhenforschungsraketen, sogenannten Sounding Rockets. Dabei werden die durchzuführenden Experimente in eine Rakete integriert, die auf einer ballistischen Flugbahn einige hundert Kilometer in die Höhe geschossen wird. Auf einem Abschnitt einer elliptischen Bahn um das Apogäum fliegend erreicht eine solche Höhenforschungsrakete Experimentierzeiten von bis zu 500 Sekunden. Flüge der ESA Höhenforschungsraketenprogramme Maser und Maxus werden regelmäßig in Kiruna (Schweden) durchgeführt. Nachteile sind die geringe Verfügbarkeit und die hohen Kosten der Flüge. Zusätzlich ist es notwendig, ein Experiment vollständig zu automatisieren, da manuelle Eingriffe während der Flugdauer nicht möglich sind. Weiterhin ist eine Limitierung der Ausmaße eines zu fliegenden Experiments auf etwa 40 cm Durchmesser und 150 cm Höhe notwendig. Dafür ist die Qualität der Mikrogravitation während eines Fluges einer Höhenforschungsrakete qualitativ ähnlich gut, wie ein Abwurf in einem Fallturm. Es werden dabei Beschleunigungen von unter $10^{-4}g$ erreicht (ESA 2005).

3.2.4 Parabelflug

Bei einem Parabelflug fliegt ein herkömmliches Flugzeug (Abbildung 3.3 zeigt ein solches Flugzeug) auf einer Trajektorie, die einer Parabel ähnelt. Das Flugzeug beschleunigt zunächst auf die ihm maximal mögliche Geschwindigkeit. Ist diese erreicht, zieht der Pilot das Flugzeug steil nach oben bis zu einem Anstellwinkel von 47 Grad. Bei diesem Anstellwinkel werden die Antriebsaggregate gedrosselt. Während des Aufstiegs bis zum Drosseln der Triebwerke herrscht im Flugzeug erhöhte Beschleunigung von 1,5 g bis 1,8 g senkrecht zum Flugzeugboden. Dies ist die sogenannte Hypergravitationsphase. Abbildung 3.4 verdeutlicht die Bahn des Flugzeugs.

Die Drosselung der Triebwerke bewirkt ein Fortsetzen der Flugbahn des Flugzeuges auf einer ballistischen Bahn, wobei ein Restschub der Triebwerke notwendig ist, um Reibungsverluste des Flugzeugrumpfes mit der Atmosphäre zu kompensieren. Nach einer Übergangsphase von einigen Sekunden tritt das Flugzeug in die Mikrogravitationsphase ein. In dieser etwa 22 Sekunden andauernden Phase herrscht im Flugzeug Mikrogravitation, dabei liegt die Restbeschleunigung in der Regel zwischen 0,05 g und -0,05 g . Nachdem das Flugzeug die Parabelspitze durchflogen hat und in den Sturzflug übergeht, wird es von den Piloten bei einem Anstellwinkel von 42 Grad abgefangen. Nach einer weiteren Übergangsphase von einigen Sekunden folgt wiederum eine Hypergravitationsphase, in der im Flugzeug 1,5 g bis 1,8 g wirken und die ebenfalls etwa 20 Sekunden dauert. Danach geht das Flugzeug wieder in den Horizontalflug über. Abbildung 3.4 verdeutlicht das Flugmanöver.



Abbildung 3.3: Parabelflugzeug der französischen Firma Novespace, die Parabelflüge für die ESA durchführt. Es handelt sich um ein herkömmliches Verkehrsflugzeug des Typs Airbus A300, das durch Modifikationen im Innenbereich angepaßt wurde: Die Schnittzeichnung verdeutlicht, daß das Innere des Flugzeuges im Mittelbereich von der Bestuhlung befreit wurde, um Platz für die eingebauten Experimente zu schaffen.

Während eines Parabelfluges wird dieses Manöver nicht nur ein einziges Mal durchgeführt, sondern mehrmals wiederholt. In der Regel werden bei den ESA-Parabelflugkampagnen 30 Parabeln je Flug geflogen, so daß je Flug etwa 10 Minuten Experimentierzeit erreicht werden. Die Parabeln werden mit einem Abstand von drei Minuten in Gruppen zu je fünf Parabeln geflogen, die jeweils durch eine mehrminütige Pause unterbrochen werden. Zu Beginn des Fluges wird eine Extraparabel geflogen, um neuen Teilnehmern eine Eingewöhnung zu ermöglichen. Die Sequenz der geflogenen Parabeln ist Abbildung 3.5 zu entnehmen.

Die Vorteile von Parabelflügen ist die vergleichsweise lange Experimentierphase von immerhin 22 s zu relativ geringen Kosten. Es ist weiterhin nicht notwendig, daß Experimente zu automatisieren, da manuelle Eingriffe während des Fluges durch die Experimentatoren möglich sind. Erkauft werden diese Vorteile allerdings durch eine qualitativ recht schlechte Mikrogravitation: Durch Wettereinflüsse, wie zum Beispiel Turbulenzen im Fluggebiet, werden Flugmanöver notwendig, und um die Luftreibung zu kompensieren, ist ein geringer Schub aus den Triebwerken notwendig. In der Regel können Mikrogravitationswerte von bis zu 0,05 g erreicht werden. Die Versuche müssen bestimmte Sicherheitsvorschriften erfüllen, so daß die Durchführung von Experimenten mit Gefahrenstoffen oder riskanten Techniken an Bord des Flugzeuges eingeschränkt ist.

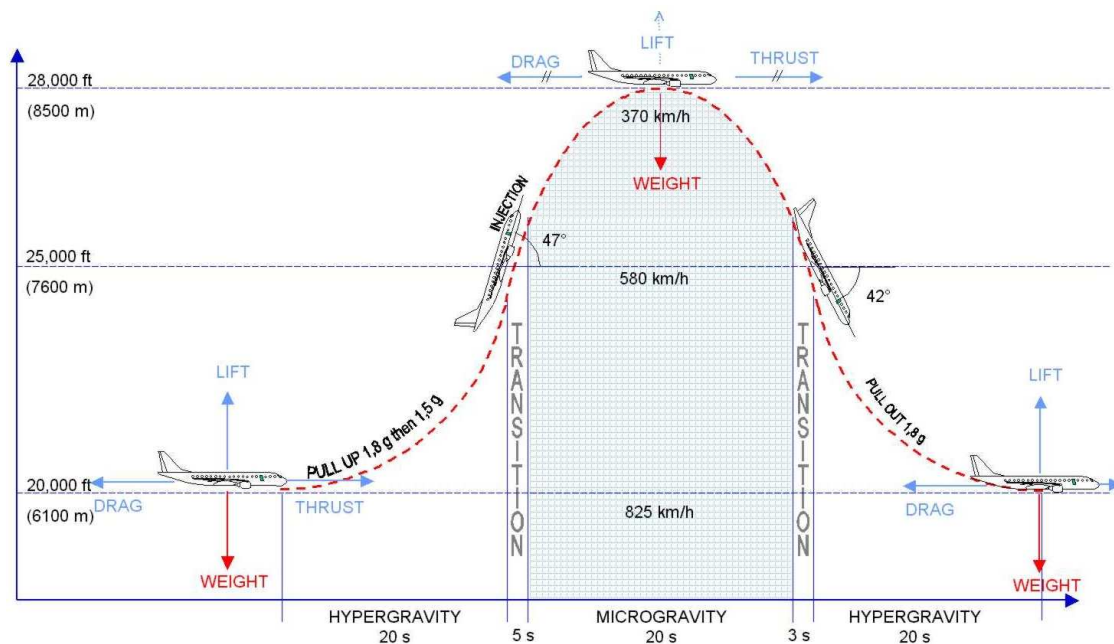


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Parabelbahn. Man erkennt die Flugbahn des Flugzeuges während einer geflogenen Parabel. Markiert sind die Kräfteverhältnisse zwischen Schub- (thrust), Luftwiderstands- (drag), Auftriebs- (lift) und Gravitationskraft (weight), sowie die Bereiche, in denen während des Aufstiegs und Abstiegs Hypergravitation ($a > 1g$), beziehungsweise in denen während der Spitze der Parabel Mikrogravitation ($a < 0,05g$) herrscht. Dazwischen liegen die kurzen Übergangsphasen (transition), in denen die Beschleunigung im Flugzeuginneren von ca. $2g$ auf unter $0,5g$ abnimmt (Novespace 2004/5).

3.2.5 Orbit

Die komfortabelste, allerdings auch mit Abstand teuerste Möglichkeit, Mikrogravitationsexperimente durchzuführen, ist der Erdorbit. Die Verwendung von Satelliten oder der Internationalen Raumstation ISS als Experimentierplattform bietet die längsten Mikrogravitationsphasen. Unterbrochen werden diese nur von eventuellen Manövern des Raumfahrzeugs, wie zum Beispiel dem regelmäßige Anheben der ISS auf eine höhere Bahn, um das Absinken in Folge der Reibungsverluste in der oberen Atmosphäre zu kompensieren. Die Qualität der Mikrogravitation an Bord der ISS ist ähnlich gut wie an Bord von Höhenforschungsraketen. Die manuelle Bedienung eines Experimentes an Bord der ISS ist zwar generell möglich, aber in der Regel aufgrund der Arbeitsbelastung der Besatzungsmitglieder nicht durchführbar, so daß die Experimente auch hier automatisiert werden müssen. Auf der ISS ist ebenso wie bei den Parabelflügen die Benutzung von riskanten Techniken oder die Verwendung von gefährlichen Stoffen eingeschränkt.

Die Durchführung einer Satellitenmission für ein einzelnes Mikrogravitationsexperiment ist derart aufwendig und kostenintensiv, daß sie nur in den wenigsten Fällen erwogen wird.

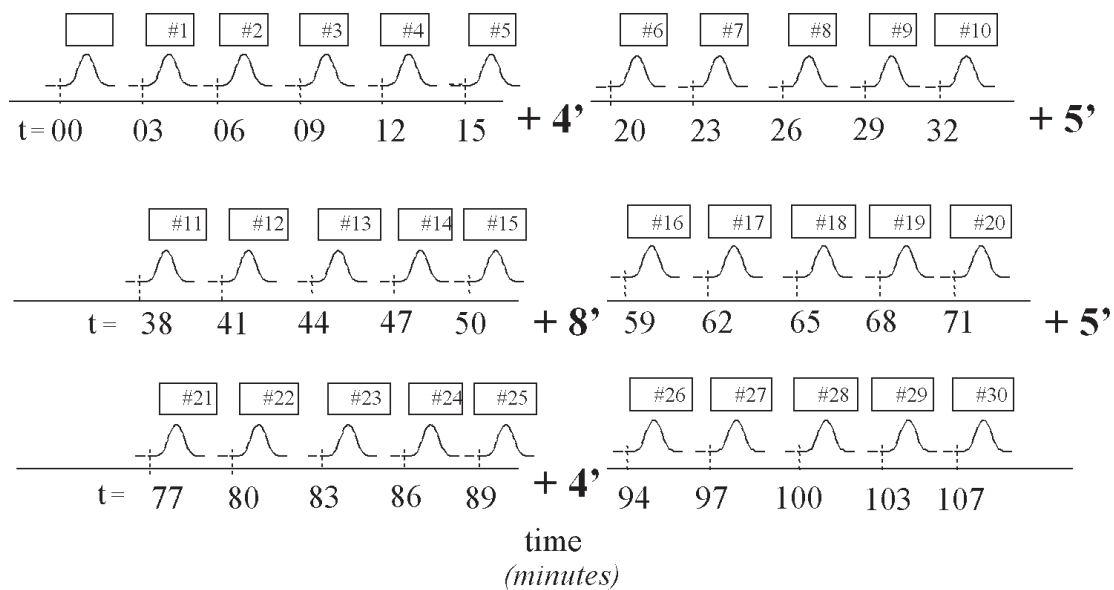


Abbildung 3.5: Parabelsequenz: Während der Flüge werden die Parabeln immer in Sequenzen zu je fünf Stück geflogen, dazwischen werden Pausen von vier bis acht Minuten eingelegt (fett gedruckte Zeitangaben). Die 0. Parabel ist zur Eingewöhnung gedacht. Diese Sequenz wird in der Regel eingehalten, nur bei plötzlichem Wetterumschwung oder unerwartet auftretenden Turbulenzen wird davon abgewichen.

3.2.6 Fazit

Im Prinzip sind die meisten der hier vorgestellten Verfahren zur Herstellung von Mikrogravitation für die experimentelle Aggregationsforschung gut geeignet. Dennoch fallen der Orbit und die Höhenforschungsraketen bereits aufgrund einiger Vorbedingungen aus: Zunächst sind diese Verfahren mit erheblichem Zeitaufwand und Kosten verbunden, weiterhin ist man sowohl bei den Höhenforschungsraketen und im Orbit als auch bei den Fallturmmexperimenten an feste Dimensionen des Versuchsaufbaus gebunden. Wie in Kapitel 5.3 gezeigt wird, sind für die durchzuführenden Experimente allerdings größere Aufbauten notwendig, die nicht in die vorgegebenen Maße passen.

Bei den Experimenten in der Levitationstrommel hat sich gezeigt, daß man zwar lange Zeiten der *Pseudomikrogravitation* erreichen kann, das Verfahren für die geplanten Experimente aber einige Schwierigkeiten aufwirft. Insbesondere wird es schwierig sein, magnetisierte Einzelpartikel auf diese Weise zum Levitieren zu bringen, da diese bereits aufgrund der zwischen ihnen wirkenden magnetischen Kräften während der Ankoppelphase zu koagulieren beginnen würden.

Die Durchführung der geplanten Experimente im Fallturm würde zwar sehr gute Mikrogravitationswerte liefern, allerdings kommt seine Verwendung nicht in Frage, da die Ausmaße des Experimentaufbaus den in der Fallkapsel zur Verfügung stehenden Raum bei weitem übersteigen (vgl. Kapitel 5.1.4 und 5.3).

Es bleiben also Parabelflüge für die Erzeugung der Mikrogravitation. Auf den ersten Blick

erscheinen die gezeigten Mikrogravitationswerte zu schlecht, um Experimente durchführen zu können. Abbildung 3.6 verdeutlicht jedoch, daß die relativ schlechten Mikrogravitationswerte dennoch ausreichen, um Partikel, die sich zu Beginn der Mikrogravitationsphase im Zentrum der verwendeten Vakuumkammer (siehe Kapitel 5.1.1) befinden, während der Versuchsdauer nicht an die Wände der Kammer stoßen zu lassen. Somit sind die Restbeschleunigungen so gering, daß sie die aggregierenden Partikel im Versuchsraum wenig beeinflussen.

Weiterhin sind die Parabelflüge aufgrund der Möglichkeit, größere Experimentalaufbauten mitzunehmen und die Experimente mittels einiger Experimentatoren manuell zu bedienen, die erste Wahl für die durchzuführenden Experimente. Zusätzliche Vorteile für die Versuchsdurchführung ergeben sich aus der Anzahl der geflogenen Parabeln und der Länge der Mikrogravitationszeit.

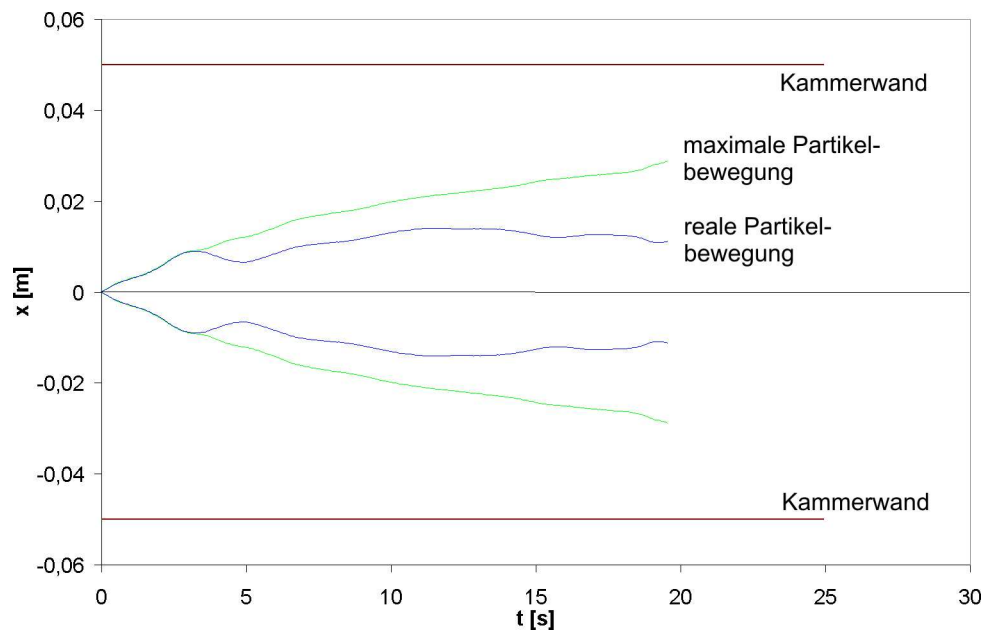


Abbildung 3.6: Partikelbeschleunigung während der Mikrogravitationsphase: Die roten Linien zeigen die Ausmaße der Vakuumkammer. Die grüne Linie zeigt die Bewegung eines Partikels im ungünstigsten Fall, falls die gesamte Beschleunigung kontinuierlich in eine Richtung wirkt, hierbei wurde der Betrag der Beschleunigung zugrunde gelegt. Die blaue Linie zeigt den realen Verlauf der Teilchenbewegung aufgrund der während eines Fluges gemessenen Beschleunigung in z-Richtung. Alle verwendeten Beschleunigungsdaten wurden realen Meßwerten während eines Parabelfluges entnommen.

3.3 Magnetische Felder und Partikel

3.3.1 Magnetische Umgebungsbedingungen

Die magnetischen Bedingungen in jungen Planetensystemen wurden in Kapitel 2.3 erörtert. Es ist essentiell, diese Bedingungen während der Experimente herzustellen. Als größter Störfaktor erweist sich hierbei das Magnetfeld der Erde. Mit seinen rund 50.000 nT ist es von erheblicher Größe und bei den Aggregationsexperimenten nicht zu vernachlässigen (vgl. Kapitel 4.4). Eine Möglichkeit, den Einfluß dieses Feldes auf den Aggregationsprozeß zu verhindern, ist zwingend erforderlich.

Was auf den ersten Blick nicht schwer erscheint, ist in der technischen Durchführung aufgrund der Parabelbahnen des Flugzeugs schwierig. Neben den räumlichen Schwankungen des lokalen Erdmagnetfeldes an Bord des Flugzeuges gilt es auch, die Störungen anderer Experimente an Bord und des Flugzeuges selber zu kompensieren. Ist es erst einmal gelungen, sich von den störenden Einflüssen des Erdmagnetfeldes und anderer externer Störfelder zu befreien, ist es notwendig, ein konstantes Magnetfeld anzulegen. Dieses sollte dann möglichst in der Größenordnung der Felder in der Nähe von Protosternen liegen. Nähere Betrachtungen zu Feldverlauf und geeigneten Systemen zur Kompensation und Erzeugung von Magnetfeldern sind in Kapitel 4.5 zu finden.

3.3.2 Magnetischer Staub

Für die Durchführung der Aggregationsexperimente müssen Staubsorten gefunden werden, die man als Äquivalent zu den Staubpartikeln in frühen Sonnensystem verwenden kann. Größe und Material wurden in Kapitel 2.2.1 näher erläutert.

Von entscheidender Bedeutung sind die magnetischen Eigenschaften der zu verwendenden Partikel. Um eine einheitliche und damit auch modellierbare Magnetisierung der Partikel zu erhalten, ist es notwendig, daß es sich um sogenannte *Einbereichsteilchen* handelt. Diese Partikel weisen innerhalb eines einzelnen Partikels keinen Bruch der Magnetisierungsrichtung auf. Man nennt diese Bereiche gleichgerichteter Magnetisierung *Weißsche Bezirke*. Diese *Weißschen Bezirke* sind diejenigen Volumina eines Materials, in dem eine einheitliche Magnetisierungsrichtung vorherrschen kann. Übersteigen die Ausmaße der Einzelpartikel dieser Größe, so kann sich die Magnetfeldrichtung innerhalb eines Partikels des Materials ändern, womit das Teilchen im Extremfall nach außen unmagnetisch erscheint, weil sich die Einzelmagnetisierungen der Bereiche gerade aufheben. Die gleichgerichtet magnetisierten Bereiche des Materials werden durch sogenannte *Blochwände* voneinander getrennt. Kittel (1949) gibt für die minimale Größe von Partikeln, ab der sich diese Wände ausbilden, und damit für die maximale Größe d_E der sich ausbildenden *Weißschen Bezirke*

$$d_E = 18\mu_0 \cdot \frac{\sigma_w}{M_s} \quad (3.3)$$

an, wobei σ_w die notwendige Energie zum Ausbilden einer *Blochwand* und M_s die Sättigungsmagnetisierung ist.

Weitere entscheidende Faktoren sind die Hystereseeigenschaften der Partikel. Dabei ist es wichtig, daß die Partikel die ihnen eigene Magnetisierung nicht innerhalb kürzester Zeit verlieren. Dazu ist es notwendig, daß die Koerzitivfeldstärke H_C des Materials, also die magnetische Feldstärke, die notwendig ist, um eine Ummagnetisierung des Materials zu bewirken, möglichst groß ist. In diesem Fall hält das Material lange seine Magnetisierung und wird durch externe Störfelder, wie zum Beispiel das Erdmagnetfeld, wenig beeinflusst. Dabei soll das Material trotzdem eine hohe Sättigungsmagnetisierung M_s und damit auch eine hohe remanente magnetische Induktion B_R haben, damit die magnetischen Wirkungen innerhalb der kurzen Aggregationszeit auch zur Wirkung kommen. Abbildung 3.7 verdeutlicht die magnetischen Größen.

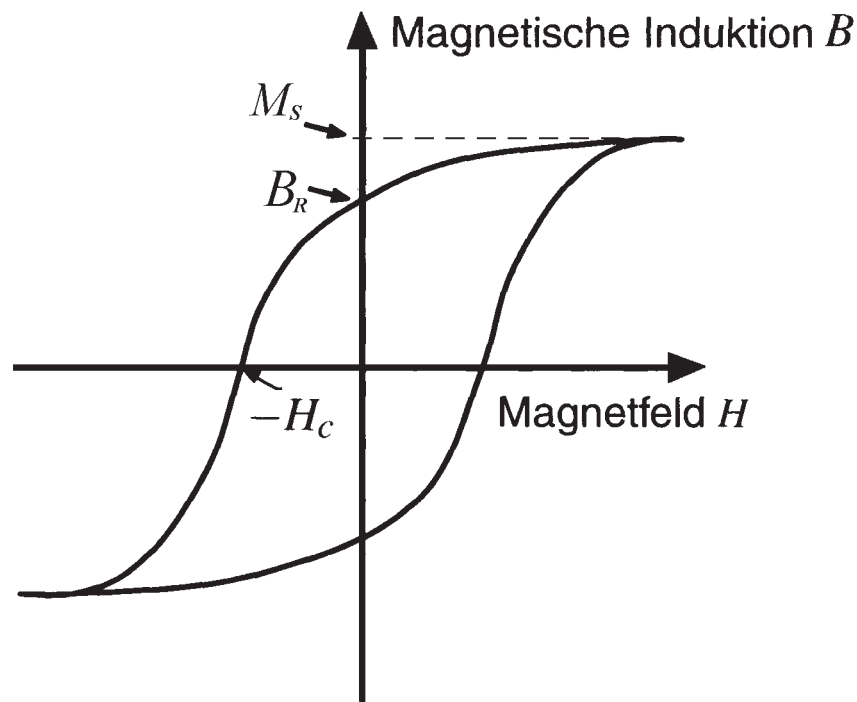


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung einer Hysteresekurve: Man erkennt die remanente Induktion des Materials B_R als Achsenabschnitt der magnetischen Induktion und die Koerzitivfeldstärke H_C als negativen Achsenabschnitt der Magnetfeldachse (Kittel 1999).

Als letzte Materialeigenschaft ist die Curietemperatur für die Partikeleigenschaften von Bedeutung: Dies ist die Temperatur oberhalb derer die remanente Magnetisierung des Materials durch thermische Effekte komplett zerstört wird. In der Regel liegt diese Temperatur deutlich unterhalb des Schmelzpunktes des Materials, so daß die Magnetisierung unter Erhaltung der Partikel zerstört werden kann. Für die durchzuführenden Experimente ist nur von Bedeutung, daß die Curietemperatur während der Durchführung nicht in dem Maße überschritten wird, daß die Magnetisierung zerstört wird.

4 Aggregationsexperimente und Vorbetrachtungen

Die experimentelle Untersuchung von magnetischen Aggregationsvorgängen als Hauptteil dieser Arbeit bedarf einiger Vorbetrachtungen und Voruntersuchungen bezüglich der technischen Durchführbarkeit. Das folgende Kapitel beleuchtet die vorausgehenden Experimente und Untersuchungen sowie die Überlegungen zur Planung im Vorfeld der Aggregationsexperimente unter variablen Magnetfeldbedingungen.

4.1 Das ADAM-Experiment

Vorläufer der in dieser Arbeit vorgestellten Experimente war das sogenannte ADAM-Experiment¹, das im Rahmen der ESA-PFC im Mai 2001 geflogen wurde. In diesem Versuchsaufbau wurden in früheren Experimenten² erprobte Aufbauten und Techniken zu Aggregationsexperimenten unter Mikrogravitation verwendet. Das ADAM-Experiment verwendete weitgehend die gleichen Komponenten und Techniken wie die in dieser Arbeit vorgestellten Experimente.

Das Experiment verwendete sowohl die in Kapitel 5 beschriebene Vakuumkammer und die dort erläuterten Staubeinschußgeräte als auch einen Großteil der dort beschriebenen Beobachtungs-, Meß- und Aufzeichnungsausrüstung. Es wurden Experimente mit unterschiedlichen Staubmischungen verschiedener magnetischer und nichtmagnetischer Partikel (siehe Kapitel 4.2) durchgeführt. Dabei wurden sowohl Experimente mit den jeweils reinen Staubsorten als auch mit Mischungen der Stäube verschiedener Verhältnisse durchgeführt. Bei diesen Experimenten wurde allerdings der Einfluß des sie umgebenden Magnetfeldes vernachlässigt. Daten und Ergebnisse des ADAM-Experimentes wurden in diesem Kapitel verwendet, um die Rahmenbedingungen für die Folgeexperimente zu ermitteln.

Die während des ADAM-Experimentes gewonnenen Filme und Bilder zeigen eine systematische Ausrichtung der gewachsenen Aggregate während des Aggregationsprozesses in der Schwerelosigkeitsphase, die in Kapitel 4.3 näher untersucht wird. Technische Details

¹Aggregation of Dust Accelerated by Magnetic forces

²Im Rahmen der Studentischen ESA-Parabelflugkampagne 3 wurden von einer Studentengruppe im Jahre 2000 die Hauptkomponenten des Versuchsaufbaus im Flug unter Mikrogravitation erprobt und Aggregationsexperimente durchgeführt. Näheres zu diesem Experiment ist in Rost (2001) zu finden.

und weitere Ergebnisse des ADAM-Experimentes finden sich bei Rost (2001), Ergebnisse der Vorläuferexperimente und von Teilen des ADAM-Experimentes bei Nübold et al. (2003).

4.2 Eigenschaften des verwendeten Staubes

Für die Durchführung von Aggregationsexperimenten mußte ein geeignetes Analogmaterial gefunden werden. Es stehen eine Vielzahl von verschiedenen Stäuben mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Verfügung. Größte Bedeutung für Aggregationsexperimente im Zusammenhang mit der Erforschung der Entstehung von Planeten und anderen Körpern in jungen Sternensystemen haben hierbei Silikatpartikel. Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung - sie ähnelt in weiten Teilen der von Olivinen und Pyroxenen, die im früheren Sonnensystem häufig auftraten (Gail 1998, Pollack et al. 1994) - eignen sie sich besonders gut für die Verwendung in den Aggregationsexperimenten. Meist werden die Teilchen in sphärischer Form und in definierten Korngrößen geliefert, was die Vergleichbarkeit der Experimente mit den Simulationen von Nübold und Glassmeier (2000) gewährleistet.

Die Auswahl an magnetischen Teilchen, die sich für die Verwendung in den magnetischen Aggregationsexperimenten eignen, ist dagegen sehr eingeschränkt: Die meisten verfügbaren magnetischen Partikel weisen Paramagnetismus auf, so daß sie nur unter einem anliegenden Magnetfeld magnetische Eigenschaften aufweisen. Diese Teilchen werden im biologischen und medizinischen Bereich zum Beispiel zur Zellseparation³ verwendet. Partikel in der geforderten Größenordnung mit remanenter Magnetisierung sind nur in äußerst begrenzter Auswahl verfügbar.

4.2.1 Eisenpartikel

In Vorläuferexperimenten (siehe Kapitel 4.1) wurden von Nübold et al. (2003) teilweise Eisenpartikel verschiedener Größenordnungen zur Aggregation verwendet. Diese Partikel mußten vor den Aggregationsexperimenten zunächst aufmagnetisiert werden. Aufgrund ihrer weichmagnetischen Eigenschaften verlieren diese Teilchen ihre Magnetisierung jedoch innerhalb weniger Tage, was eine zuverlässige Bestimmung ihres magnetischen Momentes schwierig macht. Dies ist eine Folge der magnetischen Eigenschaften von Eisen, das zwar eine hohe Sättigungsmagnetisierung und damit hohe remanente magnetische Induktion von $B_R = 2,1$ T besitzt, aber eine relativ geringe Koerzitivfeldstärke von $H_C = 100$ A/m aufweist. Das führt dazu, daß sich grundsätzlich stark magnetisierte Eisenpartikel durch Anlegen eines relativ schwachen, anders gerichteten Magnetfeldes schnell wieder entmagnetisieren.

³Zellseparation ist ein Verfahren, mit dem Zellen, die die magnetischen Partikel aufnehmen, durch äußere Felder von denen getrennt werden, die die Partikel nicht aufnehmen.

Eisenpartikel liegen außerdem nur in unregelmäßiger Form in sehr breit gestreuter Größenverteilung vor (siehe Abbildung 4.1 und Tabelle 4.2), was einen Vergleich mit den Simulationen von Dominik und Nübold (2002) erschwert. Aus diesen Gründen sind die Eisenpartikel nicht optimal für die Experimente. Abbildung 4.4 a) zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme einer Probe der Eisenpartikel, die am Institut für Werkstoffkunde der TU-Braunschweig aufgenommen worden sind.

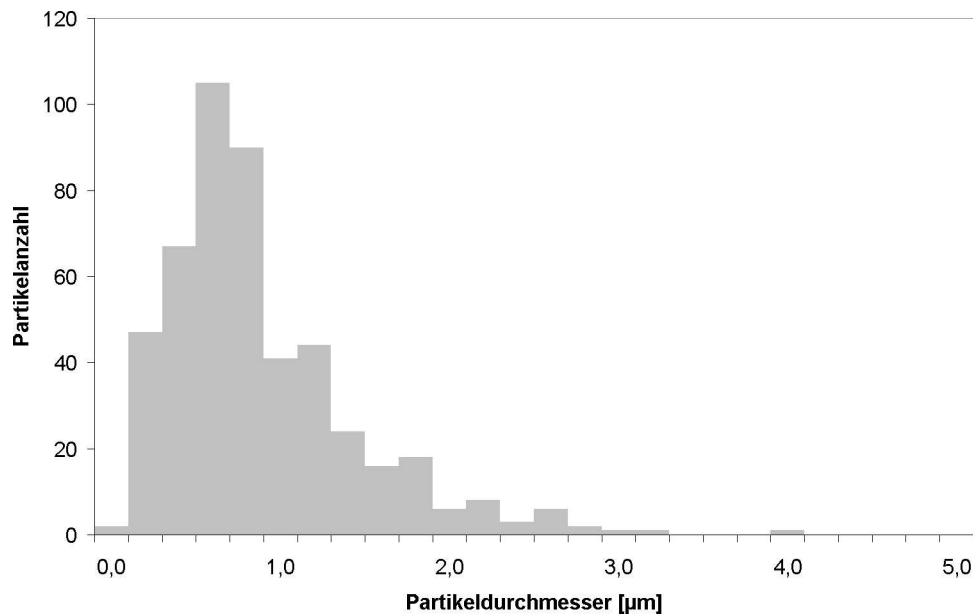


Abbildung 4.1: Größenverteilung der Eisenpartikel: Es wurden insgesamt 480 Teilchen auf 5 Bildern für die Statistik herangezogen. Wie man erkennt, liegt die Größenverteilung im wesentlichen zwischen 0,2 und 2,8 µm, wobei es einige Ausreißer unterhalb und oberhalb dieser Werte gibt.

4.2.2 Bariumferritstaub

Der von uns als magnetische Staubkomponente verwendete Bariumferritstaub wurde von der Magnetfabrik Bonn zur Verfügung gestellt. Diese Art von Partikeln wird benutzt, um Permanentmagnete für die verschiedensten Anwendungen zu produzieren. Da das Material in Pulverform vorliegt, lassen sich daraus beliebige Formen durch Pressung oder Sinterung herstellen. Die Korngröße des Materials läßt sich unter dem Mikroskop zu etwa 1 µm ermitteln, eine statistische Größenverteilung der Partikel ist in Abbildung 4.2 zu erkennen. Diese Größenverteilung ist zur Simulation der magnetischen Staubkomponente in protoplanetaren Scheiben gut geeignet, da sie der vermuteten Korngröße der Partikel in der Akkretionsscheibe im frühen Sonnensystem ähnlich ist. Wie Abbildung 4.4 b) verdeutlicht, liegt der Staub nicht in sphärischer Form - wie die weiter unten beschriebenen Silikatpartikel - sondern in Form von kleinen Scheibchen vor.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Eisenpartikeln, liegt die Koerzitivfeldstärke von Bariumferrit mit einem Wert von etwa $H_C = 240.000 \text{ A/m}$ um drei Größenordnungen hö-

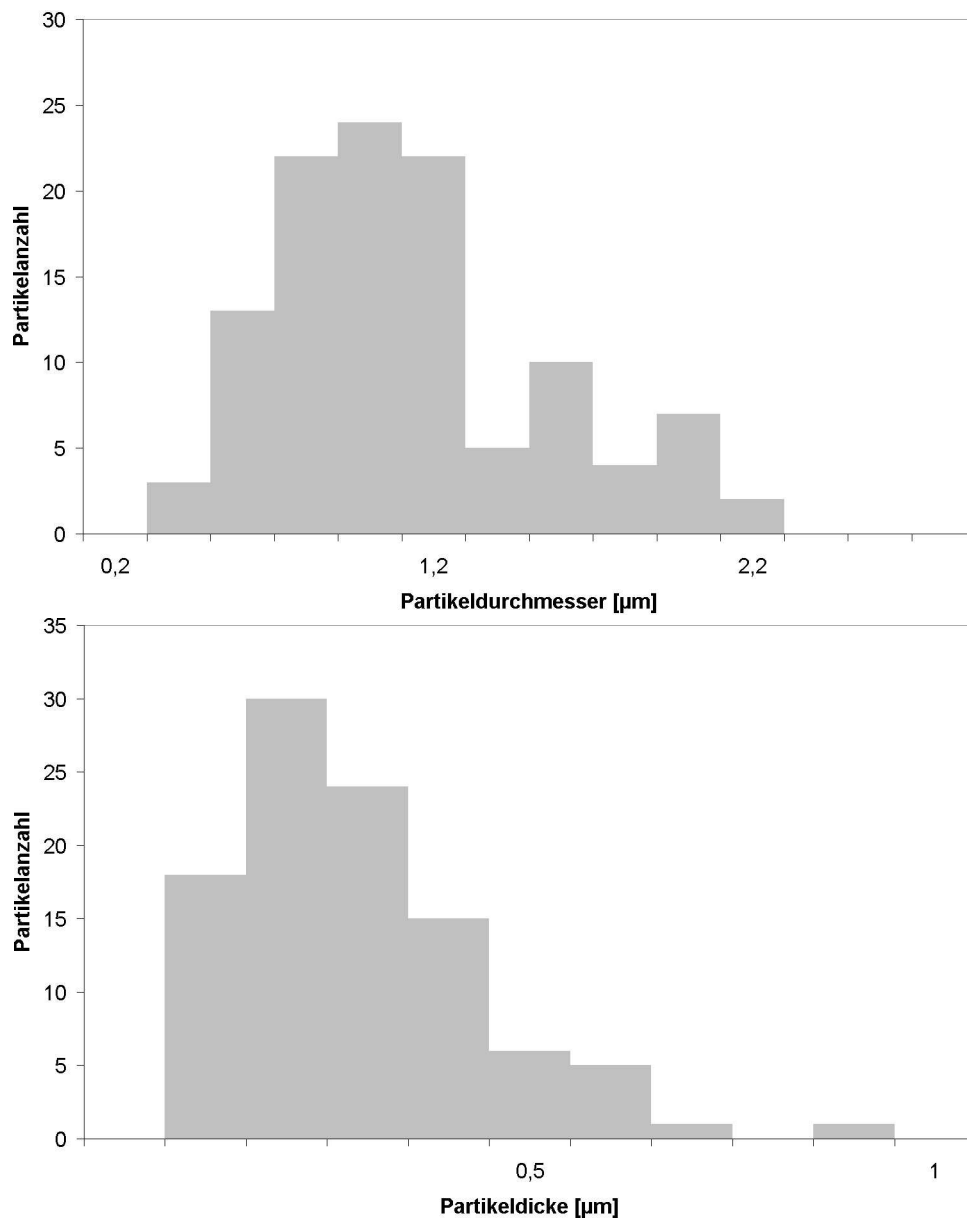


Abbildung 4.2: Größenverteilung der Bariumferritpartikel: Für die Statistik wurden 112 Partikel von insgesamt 5 Bildern herangezogen. Die Verteilung ist jeweils für den Durchmesser und die Höhe der scheibenförmigen Partikel aufgetragen. Man erkennt, daß sich die meisten Partikel im Bereich des vom Hersteller angegebenen Durchmessers befinden. Der deutlich größte Teil liegt zwischen 0,8 und 1,2 µm bei einer Scheibendicke von etwa 0,3 bis 0,4 µm.

her als die von Eisen, so daß eine Ent- oder Ummagnetisierung wesentlich schwieriger ist. Man spricht von einem hartmagnetischen Material, das für unsere Experimente eine höhere Eignung vorweist. Dagegen liegt die spezifische Sättigungsmagnetisierung μ_{spez} mit einem Wert von 63 Am²/kg etwa bei einem Drittel der Sättigungsmagnetisierung von Eisen.

Bariumferrit ist eine Verbindung aus Barium, Eisen und Sauerstoff mit der chemischen Zusammensetzung $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Diese Elemente sind in einer dem *Spinell* ähnlichen⁴ Struktur angeordnet, die dem Material zu ferrimagnetischem Verhalten (Néel 1942, Kittel 1999) verhilft. Unterhalb der sogenannten *Néeltemperatur* – dem Äquivalent zur Curietemperatur beim Ferromagnetismus – verhält sich das Material wie ein Ferromagnet.

Nach Formel 3.3 ergibt sich, wie in Tabelle 4.1 zu erkennen ist, für Bariumferrit ein weitaus höherer Wert für die Koerzitivfeldstärke als für Eisen. Bariumferritpartikel liegen aufgrund ihrer Scheibchenstruktur und Größe im Bereich der Einbereichsteilchen (vgl. Kapitel 3.3.2). Dagegen sind in den vorliegenden Eisenpartikeln *Blochwände* und damit Änderungen der Magnetisierungsrichtung innerhalb der Teilchen möglich, was eine sichere Annahme von Richtung und Betrag der Magnetisierung erschwert. Messungen des magnetischen Momentes der Einzelpartikel μ_t sowie eine weitere Charakterisierung des Materials finden sich bei Nübold (2001).

Staubart	B_R [T]	H_C [A/m]	$T_C; T_N$ [K]	μ_{spez} [A m ² /kg]	d_E [μm]	μ_t [A m ²]
Eisenpulver	2,1	100	1043	≈ 211	0,03	variabel
Bariumferrit	0,38	240.000	723	≈ 63	1,3	$3 \cdot 10^{-13}$

Tabelle 4.1: Magnetische Eigenschaften der verwendeten Stäube (Boll 1990, Went et al. 1952)

4.2.3 Silikatstaub

Bereits während des ADAM-Experimentes wurden neben den magnetischen Stäuben zur Aggregation auch Silikatstäube eingesetzt. Der Staubanteil im frühen Solarnebel bestand nur zum Teil aus potentiell magnetischen Partikeln (siehe auch Kapitel 2.2.1). Ein großer Teil bestand aus anderen Mineralien, zu denen auch größere Anteile Silikate gehörten. Aus diesem Grund wurden während des ADAM-Experiments nicht nur Einschüsse mit rein magnetischen Partikeln durchgeführt, sondern auch mit Mischungen aus Silikatpartikeln und magnetischen Partikeln. Dabei konnte die Integration von einzelnen Silikatpartikeln in Ketten und Netze von magnetischen Teilchen beobachtet werden (Nübold 2001). Die verwendeten Silikatpartikel stammen von der Firma Lancaster und bestehen zu 99,9% aus SiO_2 . Sie weisen einen nominalen Durchmesser von 1,5 μm auf. Aus SEM-Bildern (siehe Abbildung 4.4) konnte mit Hilfe der in Abbildung 4.3 dargestellten Größenverteilung der Durchmesser verifiziert werden. Aggregationsverhalten und weitere Eigenschaften dieser und ähnlicher Partikel wurden von Poppe et al. (2000b) untersucht und werden zum Teil in Kapitel 2.4.1 erläutert.

⁴In vielen Publikationen wird die Struktur von Bariumferrit als Spinell angegeben, jedoch handelt es sich exakt um ein hexagonales Magnetoplumbit-Gitter (Went et al. 1952).

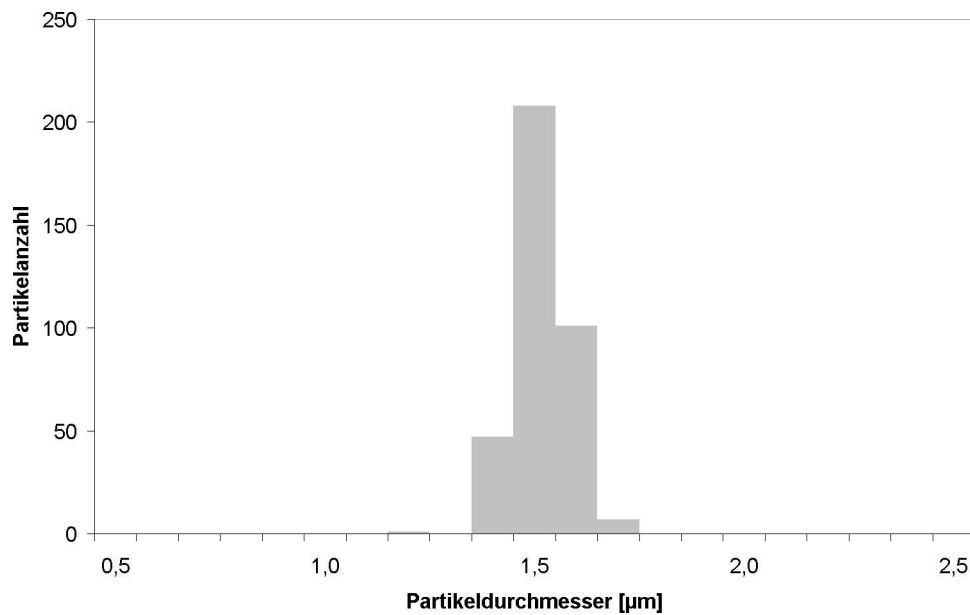


Abbildung 4.3: Größenverteilung der Silikatpartikel: Es wurden für die Statistik 364 Teilchen in insgesamt 5 Bildern ausgemessen. Man erkennt eine deutliche Zentrierung der Partikeldurchmesser um den vom Hersteller genannten Wert von 1,5 µm.

Staubart	Form	Durchmesser/Dicke [µm]	spez. Gewicht [kg/m ³]	Masse ·10 ⁻¹⁵ [kg]
Eisenpulver	sphärisch	1-6	7860	4,12-889,95
Eisenpulver	sphärisch	6-8	7860	889,95-2107,13
Bariumferrit	Scheibchen	0,5-2,4 · 0,2-0,4	4800	0,19-8,69
Silikat	sphärisch	1,5	2700	4,77

Tabelle 4.2: Eigenschaften der verwendeten Staubsorten: Der Radius wurde aus Bilder eines Elektronenmikroskops (SEM) ermittelt und daraus mittels des spezifischen Gewichtes die Masse der Einzelpartikel berechnet.

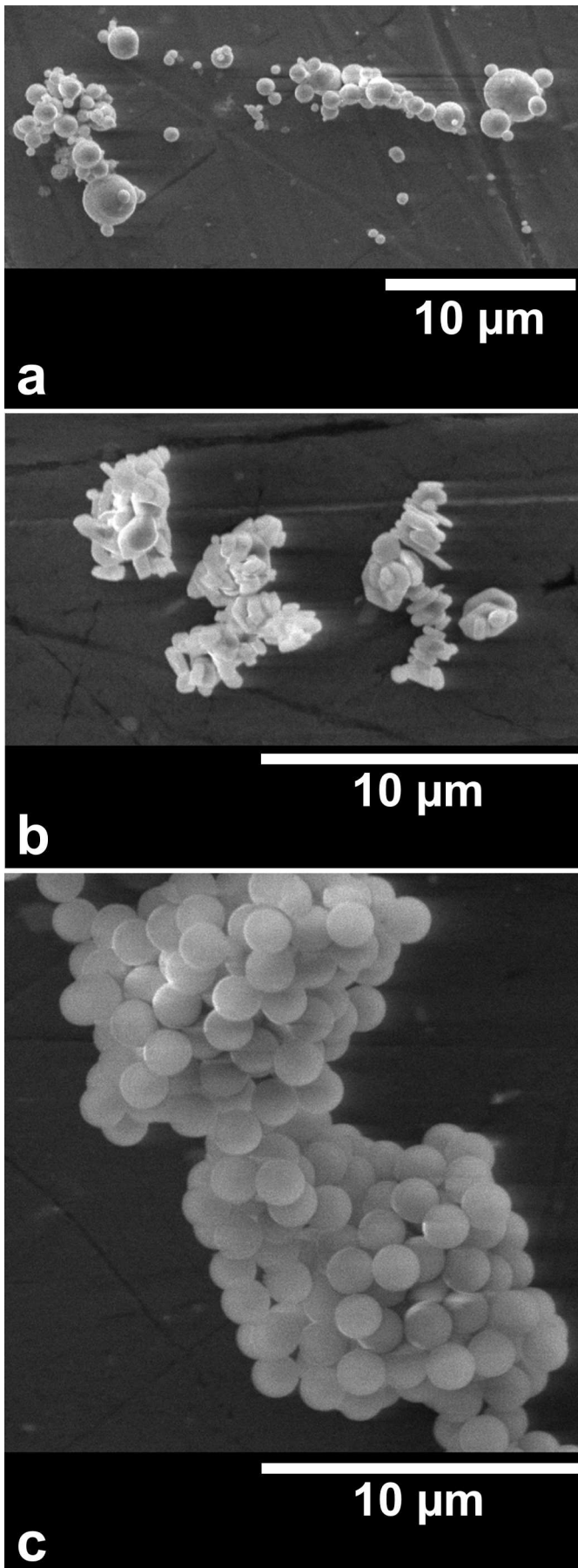


Abbildung 4.4: Verwendete Staubsorten:

Bild a) zeigt den in der ADAM-Kampagne verwendeten Eisenstaub. Die Größe der sphärischen Partikel soll laut Hersteller zwischen $6\ \mu\text{m}$ und $8\ \mu\text{m}$ variieren. Die auf dem SEM-Bild abgebildeten Partikel weisen einen Durchmesser von $0,6$ bis $2,8\ \mu\text{m}$ auf, liegen also etwas unter der Spezifikation.

Abbildung b) zeigt die Bariumferritpartikel. Die Vergrößerung des SEM-Bildes liegt bei $5000:1$. Man erkennt vier Klumpen von Teilchen aus Bariumferrit. Die Scheibchenstruktur der Partikel ist teilweise zu erkennen, dabei haben die abgebildeten Teilchen einen Durchmesser von $0,5$ bis $2,4\ \mu\text{m}$ und eine Dicke von $0,2$ bis $0,4\ \mu\text{m}$. Da die Partikel in der Regel senkrecht zur Scheibenebene magnetisiert sind, ist dies auch die Vorzugsrichtung, in der sie aufgrund der magnetischen Kräfte aneinander haften.

Die auf Abbildung c) zu erkennenden Silikatpartikel weisen eine sphärische Struktur mit einem Durchmesser von $1,4$ bis $1,6\ \mu\text{m}$ auf. Die Herstellerangaben zum Durchmesser von $1,5\ \mu\text{m}$ lassen sich ebenso wie die monodisperse Verteilung auf dem SEM-Bild verifizieren. Die einzelnen Partikel haften aufgrund von Adhäsionskräften aneinander.

4.3 Aggregatausrichtung

4.3.1 Ankoppelung der Aggregate an das Erdfeld

Die beim ADAM-Experiment gewonnenen Bilder aggregierender magnetischer Partikel zeigen eine systematische, parallele Ausrichtung von kettenartigen Strukturen. Abb. 4.5 zeigt ein typisches Ensemble von gewachsenen Aggregaten. Das Bild entstammt der ersten Parabel des dritten Fluges der ADAM-Kampagne. Das Bild wurde 26 Sekunden nach dem Einschuss des Staubes in die Kammer aufgenommen und stammt somit aus der Hypergravitationsphase nach der Mikrogravitationsphase. In dieser Phase fallen sehr viele Aggregate, die oberhalb des Bildausschnitts, den Kamera und Mikroskop erfassen, gewachsen sind, durch die Bildebene, so daß eine größere Menge an Teilchen gesichtet und untersucht werden kann. Wie man in der Abbildung gut erkennen kann, sind alle Aggregate mit wenigen Grad Abweichung parallel ausgerichtet. Dieses Phänomen ließ sich auf allen Aufnahmen der während der ADAM-Kampagne aufgenommenen Aggregate erkennen. Es liegt die Vermutung nahe, daß die Aggregatbildung durch Ausrichtung der Aggregate am Erdmagnetfeld beeinflusst wird, da sich die Stoßquerschnitte der magnetischen Partikel bei paralleler Ausrichtung gegenüber unausgerichteten Partikeln verändern.

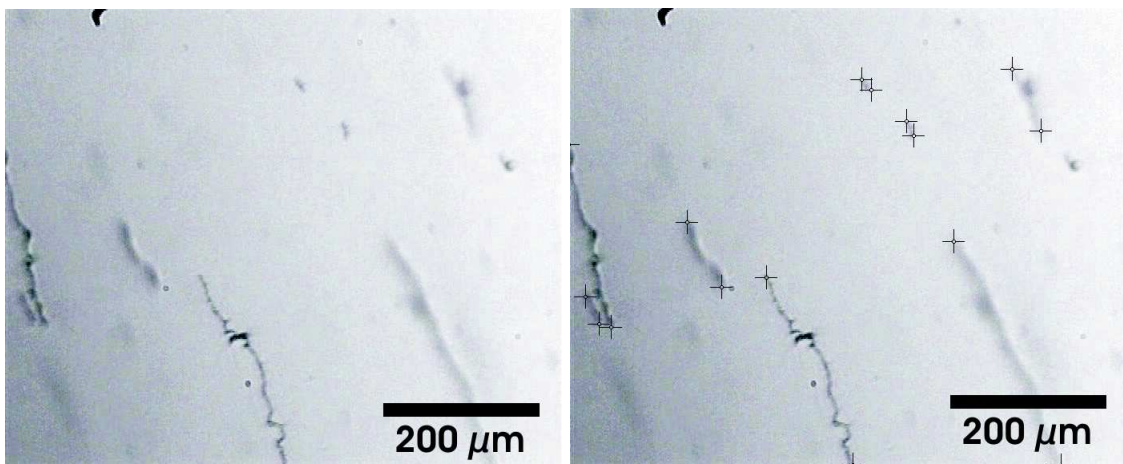


Abbildung 4.5: *In-situ*-Aufnahme einer Schar wachsender Aggregate. Das linke Bild ist die Rohaufnahme, im rechten Bild wurden die Anfangs- und Endpunkte der Aggregate markiert, um eine Auswertung der Ausrichtungswinkel durchzuführen. Der Bildausschnitt beträgt ca. $0,72 \text{ mm} \times 0,58 \text{ mm}$. Man erkennt mehrere lange Partikelketten, die allesamt entlang einer Vorzugsrichtung ausgerichtet sind.

Insgesamt wurden 203 *in-situ*-Aufnahmen des Aggregationsprozesses innerhalb der Kammer während der ADAM-Kampagne aufgenommen und die Ausrichtungswinkel der sichtbaren Aggregate statistisch ausgewertet. Da das Flugzeug und damit auch der Experimentierraum während einer Parabel eine Relativbewegung zum Erdmagnetfeld durchführt und die einzelnen Aufnahmen aus verschiedenen Zeitphasen der Parabeln sind, sind die gemessenen Winkel zunächst nicht vergleichbar, da die Richtung des Erdmagnetfeldes relativ zur Vakuumkammer zum Aufnahmezeitpunkt aus den zur Verfügung stehenden Daten

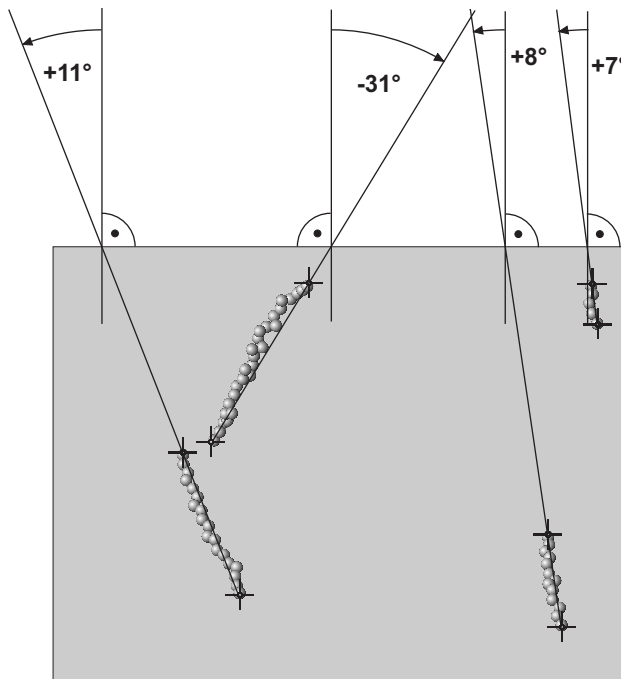


Abbildung 4.6: Bestimmung der Ausrichtungswinkel der Aggregate (schematisch): Von den deutlich auf dem Bild erkennbaren Aggregaten wird jeweils der Anfangs- und der Endpunkt markiert. Durch diese Punkte wird eine Gerade gelegt und der Schnittwinkel dieser mit dem Lot auf der Bildoberkante im mathematisch positiven Sinne gemessen. Aus den Ausrichtungswinkeln aller Aggregate auf einem Bild wird der Mittelwert gebildet. Die Differenz der einzelnen gemessenen Winkel von diesem Mittelwert ist nun die Streuung der Aggregatwinkel um Durchschnittswinkel auf diesem Bild.

nicht ermittelt werden kann⁵. Deshalb wurde jeweils zunächst die mittlere Ausrichtung aller Aggregate auf einem Bild ermittelt und als Richtung des Störfeldes angenommen. Es wurde dann die Streuung der Ausrichtung der einzelnen Aggregate um diese Durchschnittsrichtung bestimmt. Damit steht ein Maß für die Abweichung der einzelnen Aggregate von der Hauptrichtung auf jedem einzelnen Bild zur Verfügung. Diese Methode beschränkt die statistische Auswertung auf die *in-situ*-Aufnahmen, auf denen mehr als ein Aggregat abgebildet wurde. In diese Auswertung flossen die Ausrichtungswinkel von 203 Aggregaten ein. Abbildung 4.7 zeigt die Abhängigkeit der Aggregatausrichtung von der Aggregatlänge, die aus dieser Statistik ermittelt wurde.

Wie man in der Grafik erkennen kann, sind längere Aggregate besser an der Gesamtausrichtung der Aggregate auf dem gleichen Bild ausgerichtet als kürzere. Dies mag einerseits daran liegen, daß die längeren Aggregate mehr Zeit zum Wachsen benötigt haben und ihnen damit auch mehr Zeit zum Ausrichten zur Verfügung stand, andererseits aber auch am höheren magnetischen Moment längerer Aggregate, das nach Nübold und Glassmeier (2000) mit der Teilchenzahl $n^{0.63}$ wächst. Man kann erkennen, daß die meisten Aggregate in einem Korridor von ± 15 Grad um die durchschnittliche Ausrichtung auf dem Bild liegen.

Eine zeitliche Abhängigkeit der Aggregatausrichtung – aufgrund der Position zwischen Erdmagnetfeld und Flugzeug – ist nicht beobachtbar, wie man in Abbildung 4.8 erkennen kann. Somit besteht kein sichtbarer Zusammenhang zwischen der Ausrichtung der Aggregate und dem Anstellwinkel des Flugzeuges, der zu gleichen Zeiten der einzelnen Parabeln ungefähr den gleichen Wert haben sollte. Dies rührt daher, daß die Flugrichtung des Flugzeuges während des Fluges variiert und somit die Ausrichtung des Magnetfeldes

⁵Im ADAM-Aufbau war kein Magnetometer integriert, so daß keinerlei Meßwerte des lokalen Feldes in der Vakuumkammer zur Verfügung stehen.

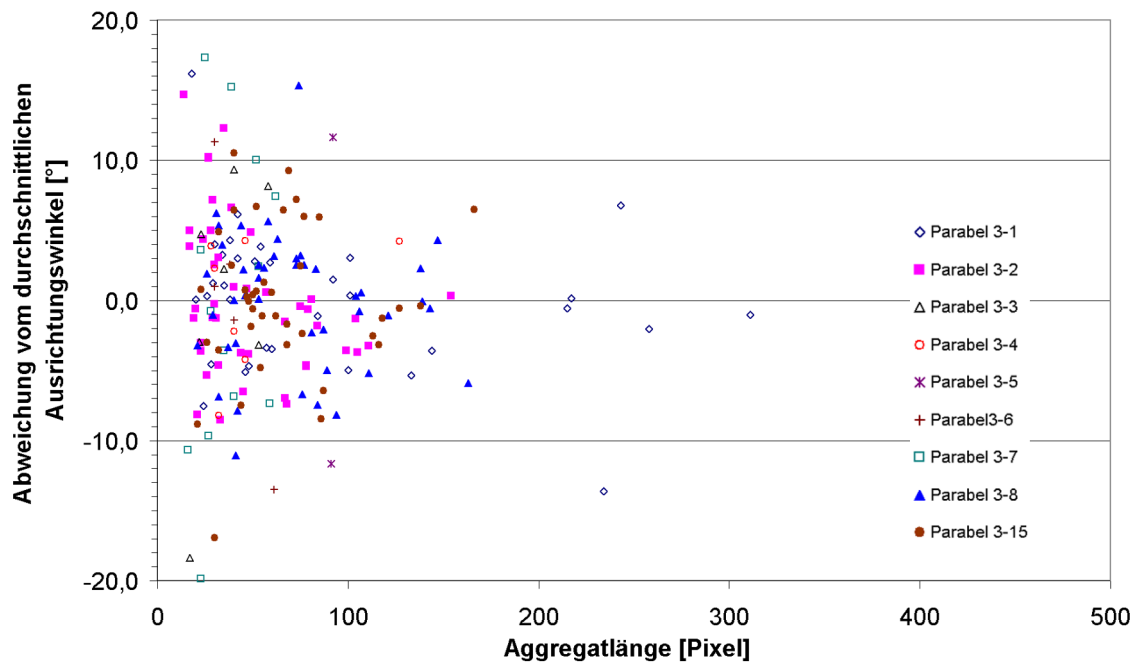


Abbildung 4.7: Ausrichtungswinkel der Aggregate in Abhängigkeit von ihren jeweiligen Längen. Man erkennt, daß längere Aggregate besser ausgerichtet sind als die kürzeren. Nur wenige Aggregate weichen mehr als 10° von der Durchschnittsrichtung ab.

innerhalb des Flugzeuges mehr oder weniger zufällig ist. Es liegen aus diesen Flügen leider keine Positions- und Richtungsdaten vor, so daß eine nachträgliche Ermittlung des an Bord herrschenden Magnetfeldes nicht möglich ist.

Abbildung 4.9 zeigt den Zusammenhang von Magnetisierung und Ausrichtung der Aggregate auf den Aufnahmen noch deutlicher. Im Graphen ist der Abweichung vom Durchschnittsausrichtungswinkel über dem Verhältnis der Magnetisierung zum Ausrichtungswinkel aufgetragen.

Eine Ausrichtung aufgrund von hydrodynamischen Wechselwirkungen der Aggregate mit dem Restgas in der Vakuumkammer ist unwahrscheinlich. Obwohl die meisten aufgenommenen Aggregate aus der Hypergravitationsphase stammen – also im Fallen zum Boden beobachtet worden sind – variieren die durchschnittlichen Ausrichtungswinkel erheblich, wie man in Abbildung 4.8 erkennen kann. Eine hydrodynamische Wechselwirkung mit dem Restgas hätte eine einheitliche Ausrichtung der Aggregate zur Folge, da die Beschleunigung während der Hypergravitationsphase bei jeder Parabel in die gleiche Richtung wirkt.

Auch eine Ausrichtung der Aggregate auf den Probenträgern, auf denen gewachsene Teilchen nach der Parabel am Boden der Kammer aufgefangen wurden (siehe auch Kapitel 5), wurde vereinzelt festgestellt. In den später durchgeführten Experimenten (vgl. Kapitel 6) konnte diese Ausrichtung unter verschiedenen magnetischen Bedingungen bestätigt werden. Die Ausrichtungen der Aggregate sind somit eindeutig auf das Erdmagnetfeld und

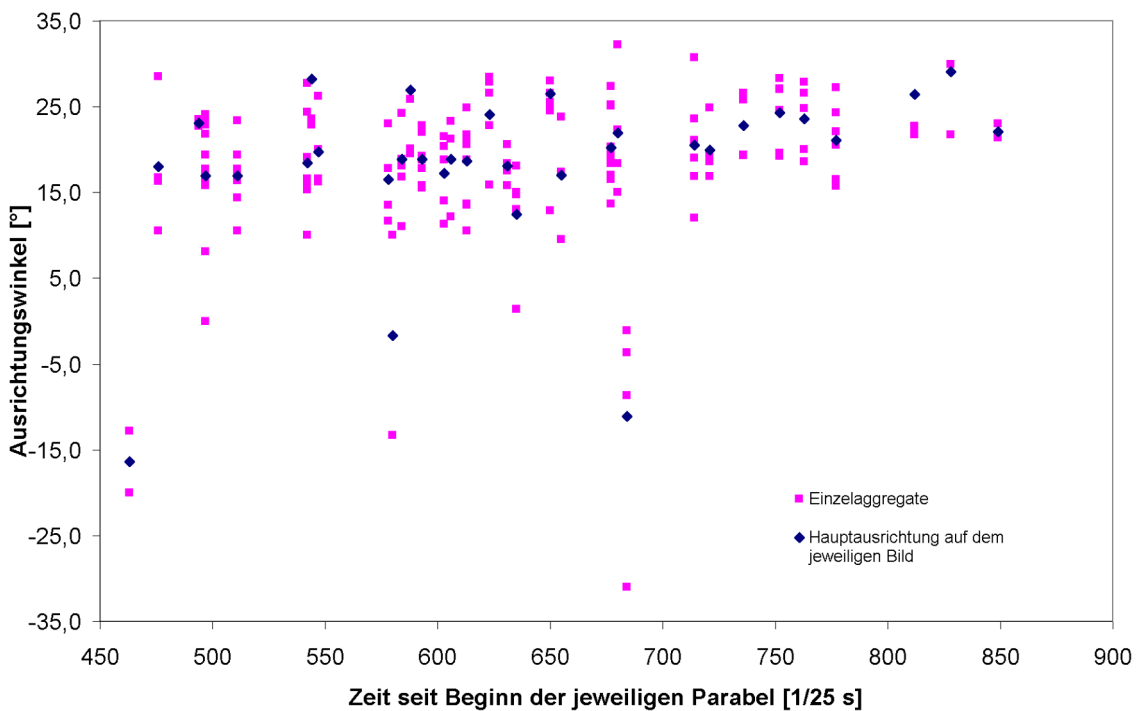


Abbildung 4.8: Ausrichtungswinkel der Aggregate in Abhängigkeit von der Zeit seit Parabelbeginn. Es sind jeweils die Ausrichtung der einzelnen Aggregate und die Durchschnittsausrichtung auf dem einzelnen Bild aufgetragen. Eine Abhängigkeit der Ausrichtung vom Zeitpunkt ist nicht erkennbar.

andere Störfelder im Flugzeug zurückzuführen. Deshalb muß in Betracht gezogen werden, die störenden Einflüsse dieser Felder zu eliminieren.

4.3.2 Richtung des Erdfeldes

Die gemessenen Ausrichtungswinkel der Aggregate hängen explizit von der Richtung des Erdmagnetfeldes ab. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Fall die Inklination⁶ des Erdfeldes. Die Bestimmung der Deklination⁷ oder der einzelnen Komponenten des Erdmagnetfeldes (Nord-, Ost- und Vertikalkomponente) sind aufgrund der nicht vorhandenen Positionsdaten der Parabelflugkampagne schwer möglich. Die Inklination läßt sich jedoch für das Fluggebiet abschätzen.

Für die Abschätzung der Inklination des Erdmagnetfeldes müssen zunächst die geographischen Breiten der Fluggebiete β in geomagnetische Breiten β^* überführt werden, da die Achse des Erdmagnetfeldes nicht mit der Rotationsachse der Erde koinzidiert, sondern um etwa $11,4^\circ$ von dieser abweicht. Die folgende Berechnung ist eine Näherungslösung

⁶Die Inklination ist die Abweichung der Richtung des Erdmagnetfeldes von der horizontalen Erdoberfläche.

⁷Die Deklination ist die Winkelabweichung des Erdfeldes von der geographischen Nordrichtung in der Horizontalen

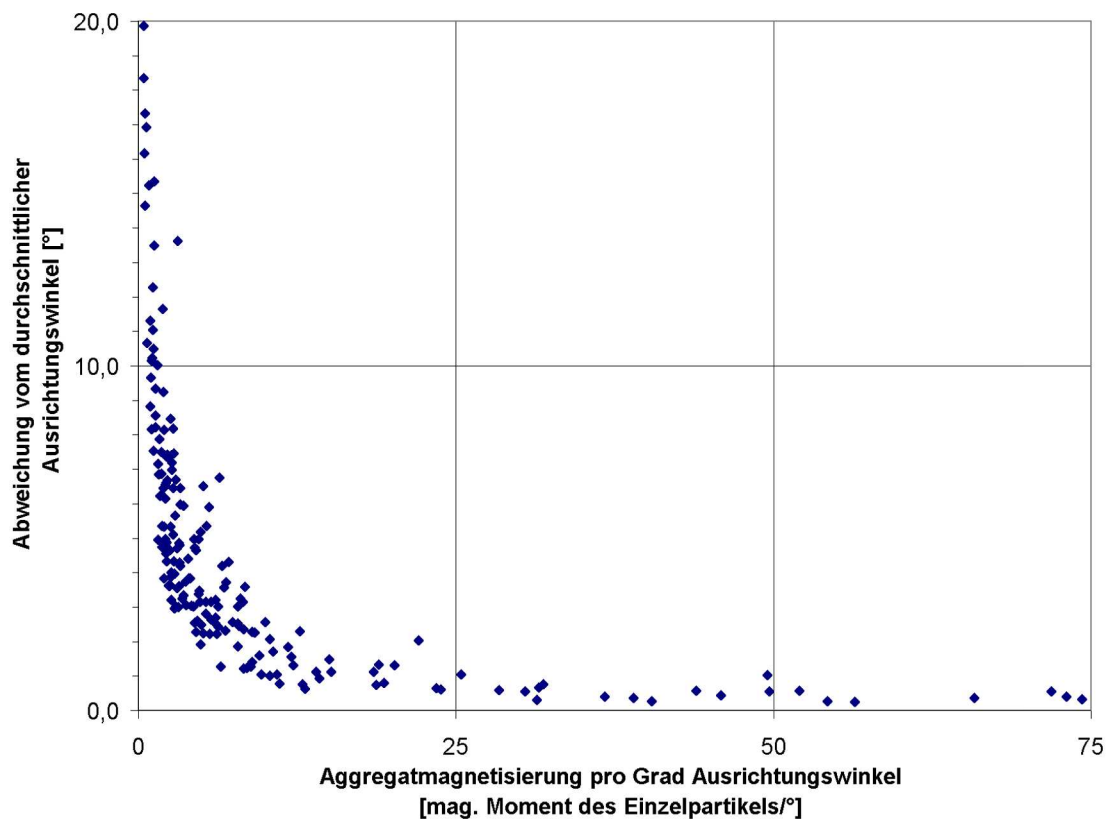


Abbildung 4.9: Aggregatausrichtung in Abhängigkeit von der Aggregatmagnetisierung: Aufgetragen ist die Abweichung der Ausrichtung der Aggregate von der Durchschnittsausrichtung aller Aggregate auf einem Bild über der Magnetisierung pro Grad des Ausrichtungswinkels.

für die Annahme, das Erdmagnetfeld sei nur ein reines Dipolfeld. Es ergibt sich nach Kertz (1992) für die magnetische Breite β^*

$$\sin \beta^* = \sin \beta_B \cdot \sin \beta + \cos \beta_B \cdot \cos \beta \cdot \cos(\lambda - \lambda_B), \quad (4.1)$$

wobei β_B und λ_B die Koordinaten des Durchstoßpunktes der magnetischen Achse sind. Damit kann nun die Inklination I in den Parabelfluggebieten berechnet werden:

$$I = \arctan(2 \cdot \tan \beta^*) \quad (4.2)$$

Eine Abschätzung der im Fluggebiet vorherrschenden Inklinationswinkel gibt Tabelle 4.3, deren Werte mit Hilfe von Formel 4.2 berechnet wurden. Als geographische Orte der Inklinationsberechnung wurden jeweils die Eckpunkte der möglichen Fluggebiete (siehe Kapitel 4.5.1, 5.4.3 und 5.5.3) so gewählt, daß die ermittelten Inklinationswerte maximal beziehungsweise minimal wurden. Damit stehen für die jeweiligen Fluggebiete Maximal- und Minimalwerte der Inklination zur Verfügung.

Für den Vergleich mit den gemessenen Ausrichtungswinkeln (siehe Kapitel 4.3) muß beachtet werden, daß die gemessenen Winkel nicht identisch mit der Inklination sind, da

I von einer horizontalen Tangentialfläche zur Erdoberfläche gemessen wird. Die Winkel der auf die Flugzeug-(Y,Z)-Ebene (siehe Kapitel 5.4.2 und 5.5.2) projizieren Aggregate wurden jedoch vom Lot auf der horizontalen Bildseite gemessen. Vergleichbar sind sie also nur mit einem Wert $I^* = 90 - I$.

Weiterhin ist zu beachten, daß das Flugzeug sich während der Parabeln nicht horizontal am Himmel bewegt und auch die Flugrichtung den an Bord herrschenden Winkel des Feldes beeinflusst. Die Inklination des Erdfeldes ließe sich nur dann an Bord messen, wenn sich das Flugzeug horizontal von West nach Ost oder von Ost nach West bewegen würde. Jede Abweichung von dieser Flugrichtung verkleinert den Winkel I^* . Auch der Anstellwinkel des Flugzeuges am Himmel bewirkt eine Verkleinerung des Winkels I^* . Somit sind die in Tabelle 4.3 angegebene Werte als Maximalwinkel anzunehmen.

Ort	Koordinaten	I [°]	I^* [°]
Bretagne	49°N, 0°W	≈ 63, 1	≈ 26, 9
Golf von Biskaya	44°N, 6°W	≈ 57, 9	≈ 32, 1
Frz. Mittelmeerküste	43°N, 2°O	≈ 58, 6	≈ 31, 4
Mittelmeer zwischen Korsika und Balearen	40°N, 7°O	≈ 57, 0	≈ 33, 0

Tabelle 4.3: Inklination des Erdmagnetfeldes in den Fluggebieten: Die Werte für die Inklination I beziehen sich jeweils auf die Eckpunkte des angegebenen Gebietes. Die Werte für I^* sind die zur Bildkante der *in-situ*-Aufnahmen korrigierten Inklinationswerte.

Verglichen mit den in Kapitel 4.3 gemessenen Ausrichtungswinkeln fällt auf, daß diese weitgehend unter den Werten für I^* liegen (siehe auch Abbildung 4.7). Die maximalen bzw. minimalen Ausrichtungswinkel liegen zwischen $-26,9^\circ$ und $31,4^\circ$ also im Bereich der berechneten Werte für I^* .

4.4 Der Einfluß externer Magnetfelder auf den Aggregationsprozeß

4.4.1 Relaxationszeit

Um die Auswirkungen des Erdmagnetfeldes und anderer störender Magnetfelder abzuschätzen, wird im folgenden die Relaxationszeit t eines Aggregates im Magnetfeld berechnet. Als Relaxationszeit wird die Zeit bezeichnet, die ein Aggregat benötigt, um von einer Ausgangsstellung des magnetischen Momentes des Aggregates – das in der Regel parallel zu angenommenen Stabrichtung liegt – senkrecht zum magnetischen Störfeld in eine Stellung zu drehen, in der das magnetische Moment parallel zum Störfeld liegt (siehe Abb. 4.10). Dabei wird sowohl die dämpfende Wirkung des Restgases in der Vakuumkammer als auch das Weiterschwingen des Aggregates über die parallele Stellung des Momentes zum Störfeld hinaus vernachlässigt, da hier nur eine grobe Abschätzung der Auswirkungen verschiedener Störfelder auf die Aggregatausrichtung gemacht werden

soll.

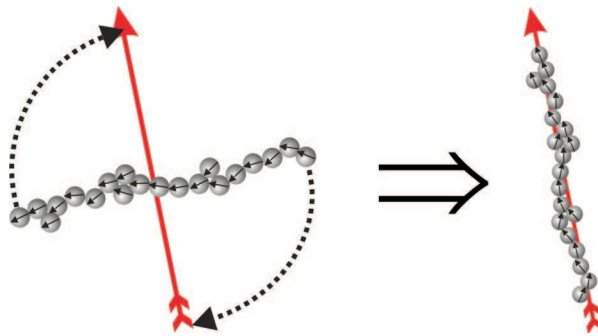


Abbildung 4.10: Relaxation eines Aggregates: Bewegung von senkrechter Ausrichtung des aus den magnetischen Momenten der Einzelpartikel aufsummierten magnetischen Gesamtmomentes eines Aggregates zu einer parallelen Ausrichtung. Der rote Pfeil repräsentiert die Richtung des externen Störfeldes, die kleinen schwarzen Pfeile die magnetischen Momente der einzelnen Aggregate.

Näherungsweise nehmen wir als Trägheitsmoment eines linearen Aggregates aus n Teilchen mit dem Radius r_t und der Masse m_t das Trägheitsmoment eines starren Stabes der Länge $l = n \cdot 2r_t$ und der Masse $m = n \cdot m_t$ bei Rotation um seine Längsachse an:

$$J = \frac{1}{12} \cdot m l^2 \quad (4.3)$$

Der Drehimpuls ergibt sich aus dem Trägheitsmoment J des Stabes und der Winkelgeschwindigkeit ω :

$$L = J \cdot \omega \quad (4.4)$$

Daraus folgt das Drehmoment M :

$$M = \frac{dL}{dt} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \dot{\omega} \quad (4.5)$$

Mit dem angreifenden magnetischen Moment $\vec{M}_t \times \vec{B}$ folgt also:

$$J\dot{\omega} = |\vec{M}_t \times \vec{B}| \sin \alpha, \quad (4.6)$$

wobei α der Winkel zwischen dem magnetischen Moment des Aggregates und dem anliegenden Magnetfeld ist. Mit $a = -|\vec{M}_t \times \vec{B}|/J$ und $\omega = \partial\alpha/\partial t$ folgt also die Gleichung

$$a \sin \alpha = \ddot{\alpha}. \quad (4.7)$$

Als Lösung ergibt sich nach Kamke (1956)

$$\alpha(t) = 2 \arcsin \left(k \cdot \operatorname{sn}(t) \cdot (\sqrt{a}(t - t_0)) \right) \quad (4.8)$$

mit

$$k = \sqrt{\sin^2 \frac{\alpha(t_0)}{2}} \quad (4.9)$$

und

$$sn(t) = t - \frac{1+k^2}{3!} \cdot t^3 + \frac{1+14k^2+k^4}{5!} \cdot t^5 - \frac{1-135k^2+135k^4+k^6}{7!} \cdot t^7 \dots \quad (4.10)$$

als Jacobische Funktion $sn(t)$. Es folgt also aus 4.8 für t :

$$t = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{k \cdot sn\sqrt{a}} + t_0 \quad (4.11)$$

Hiermit kann nun die Relaxationszeit für Aggregate mit verschiedenen Längen und Magnetisierungen in magnetischen Störfeldern verschiedener Stärke abgeschätzt werden. Mit Hilfe dieser Abschätzung können die Einflüsse der externen Störfelder auf die Aggregatausrichtung während der 22 s andauernden Experimentierphase im Parabelflugzeug (siehe Kapitel 3.2) näher betrachtet werden. Abb. 4.11 zeigt die Abhängigkeit der Relaxationszeit von der Aggregatlänge und der Stärke des Störfeldes.

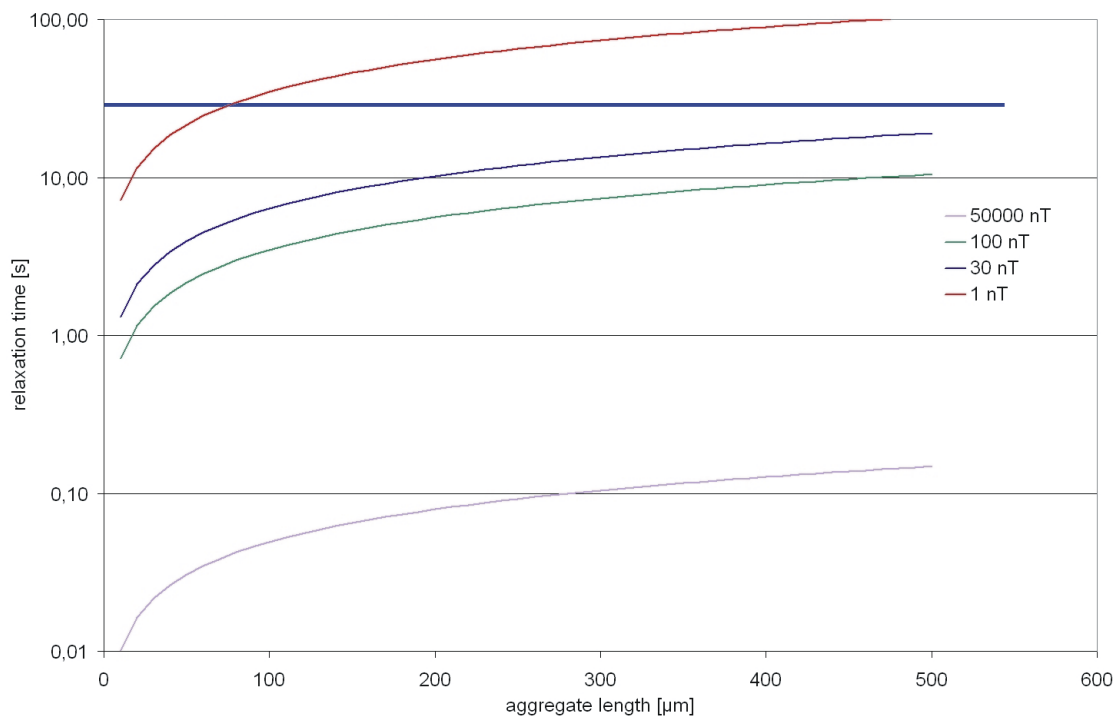


Abbildung 4.11: Abhängigkeit der Relaxationszeit von der Aggregatlänge und der Stärke des Störfeldes: Unter reduzierten magnetischen Störfeldern verlängert sich die Relaxationszeit von magnetisierten Aggregaten auf ein Vielfaches. Die blaue Waagerechte verdeutlicht die Zeit, die während einer Parabel für Experimente zur Verfügung steht (vgl. Kapitel 3.2).

Wie man in der Grafik erkennen kann, hängt die Relaxationszeit der Aggregate sehr stark von der Stärke des Störfeldes und – über das magnetische Moment – von der Länge der

Aggregate ab. Je länger die Aggregate sind, desto länger ist die Relaxationszeit. Das beruht auf dem linearen Anstieg des Trägheitsmomentes, der von dem nach Nübold und Glassmeier (2000) mit $n^{0.63}$ nicht linear wachsenden magnetischem Moment des Aggregates nicht kompensiert werden kann. Dennoch sind auch bei sehr langen Aggregaten die Relaxationszeiten in kleinen magnetischen Störfeldern wesentlich länger, so daß man bei reduziertem Magnetfeld von ungestörtem Wachstum ausgehen kann. Bei einem magnetischen Störfeld von 50.000 nT, was in der Größenordnung des Erdmagnetfeldes liegt, benötigen selbst sehr lange Aggregate von über 200 μm Länge weit unter 0,1 Sekunde Relaxationszeit, um eine Schwingung von der senkrechten zur feldparallelen Ausrichtung durchzuführen. Die Reduzierung des Störfeldes um einige Größenordnungen läßt die Relaxationszeit auf einige Sekunden anwachsen. Da die größten während der ADAM-Kampagne aufgenommenen Aggregate aus ca. 150 Partikeln mit 1 μm Durchmesser aufgebaut waren, sind hier nur die Relaxationszeiten von Teilchen unter 200 μm Länge relevant. Da die Aggregationszeit während der Parabelflüge (siehe Kapitel 3.2) 22 Sekunden beträgt, wäre es wünschenswert die Störfelder während des Experiments auf unter 5 nT zu reduzieren, da bei diesem Wert selbst Aggregate aus wenigen Teilchen nur einige Schwingungen ausführen können.

Da die Relaxationszeiten auch für größere Aggregate im Sekundenbereich liegen und die Aggregate aufgrund der für sie freien molekularen Strömung (vgl. Kapitel 3.1) deutlich mehr als eine Schwingung durchführen, ist die Ausrichtung zum Beobachtungszeitpunkt nicht perfekt. Ein Einfluß von thermischen Effekten oder Effekten aufgrund des Druckes des Restgases im Versuchsraum (vgl. Kapitel 5.1.2) würde sich durch einen negativen Einfluß auf die Ausrichtung der Aggregate bemerkbar machen; dies kann erst bei der endgültigen Ausrichtung der Aggregate registriert werden, die hier aufgrund der kurzen Experimentierzeit nicht erreicht wird. Auf den hier betrachteten Größenskalen von Aggregaten, Magnetfeldern und Restdrücken scheint das jedoch ausgeschlossen. Die gegenseitige Wirkung der Aggregate aufeinander aufgrund ihrer Dipoleigenschaften wird im folgenden Kapitel näher betrachtet und würde einen zusätzlichen Ausrichtungseffekt zur Folge haben.

4.4.2 Vergleich der wirkenden Drehmomente

Um eine Abschätzung des Einflusses von externen Störfeldern auf die aggregierenden Partikel durchführen zu können, werden im Folgenden die Drehmomente, die das Feld eines magnetischen Partikels auf ein anderes Teilchen ausübt und das Drehmoment von externen Störfeldern, wie zum Beispiel dem Erdmagnetfeld, die auf die Partikel wirken, berechnet. Zunächst wird das magnetische Feld eines sphärischen Körpers in Abhängigkeit von der Magnetisierungsrichtung und dem magnetischen Moment des Körpers berechnet. Abbildung 4.12 verdeutlicht Magnetisierung und Koordinaten. Nach Schmutzer (1989) ergibt sich das Feld solch einer magnetisierten Kugel mit dem magnetischen Moment M_t in Polarkoordinaten zu

$$B_r = \frac{\mu_0 M_t \cos \vartheta}{2\pi r^3}, \quad B_\theta = \frac{\mu_0 M_t \sin \vartheta}{4\pi r^3}, \quad B_\varphi = 0. \quad (4.12)$$

Zur Vereinfachung betrachten wir nun nur das Feld in Polrichtung, also in Richtung der Magnetisierungsachse, es folgt also für $\vartheta = 0$

$$B = B_r(\vartheta = 0) = \frac{\mu_0 M_t}{2\pi r^3}. \quad (4.13)$$

Aus dieser Formel kann nun das wirkende magnetische Feld eines Einzelpartikels $|B_t|$ und damit dessen Drehmomentwirkung auf ein anderes Teilchen in seinem Einflußbereich für verschiedene Abstände berechnet werden.

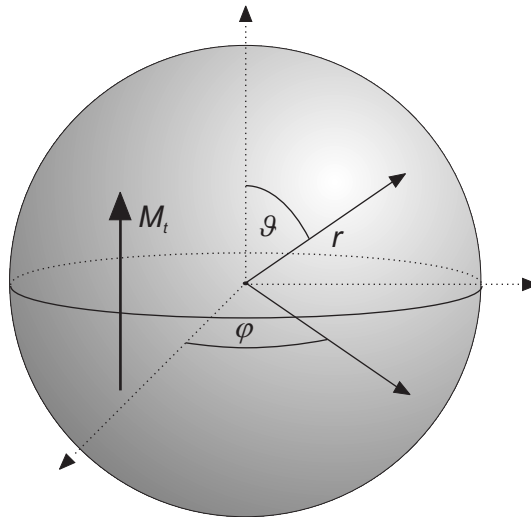


Abbildung 4.12: Koordinatensystem innerhalb einer magnetischen Kugel

Abbildung 4.13 zeigt den Betrag des magnetischen Feldes, das von einem Partikel ausgeht. Dabei ist mit dem Abstand r_{tt} der Abstand von einem Partikel genau in der Richtung der Magnetisierung des Partikels gemeint. Man erkennt in der Grafik deutlich, daß das rot eingezeichnete Magnetfeld der Erde bereits bei sehr kurzen Abständen das Partikelfeld zu dominieren beginnt.

Die folgende Grafik 4.14 verdeutlicht die Wirkung ausgewählter unterschiedlicher Felder auf die in Kapitel 4.4.1 diskutierten Drehmomente, die auf Partikel ausgeübt werden und damit auch die Relaxationszeit der Aggregate unterschiedlichen Abstands. Je größer die magnetische Momente der Partikel und damit das von ihnen emittierte Magnetfeld sind und je kleiner der Abstand der wechselwirkenden Teilchen, desto kürzer die Relaxationszeiten. Aufgrund seiner über den Versuchszeitraum angenommenen Konstanz liefert das Erdfeld (gestrichelte blaue Linie in der Abbildung) einen vom Partikelabstand unabhängigen Wert. Die Felder von Aggregaten verschiedener Länge variieren aufgrund ihrer Partikelanzahl. Im Gegensatz zum Erdfeld nehmen die Felder der Partikel und Aggregate jedoch stark mit dem Abstand ab.

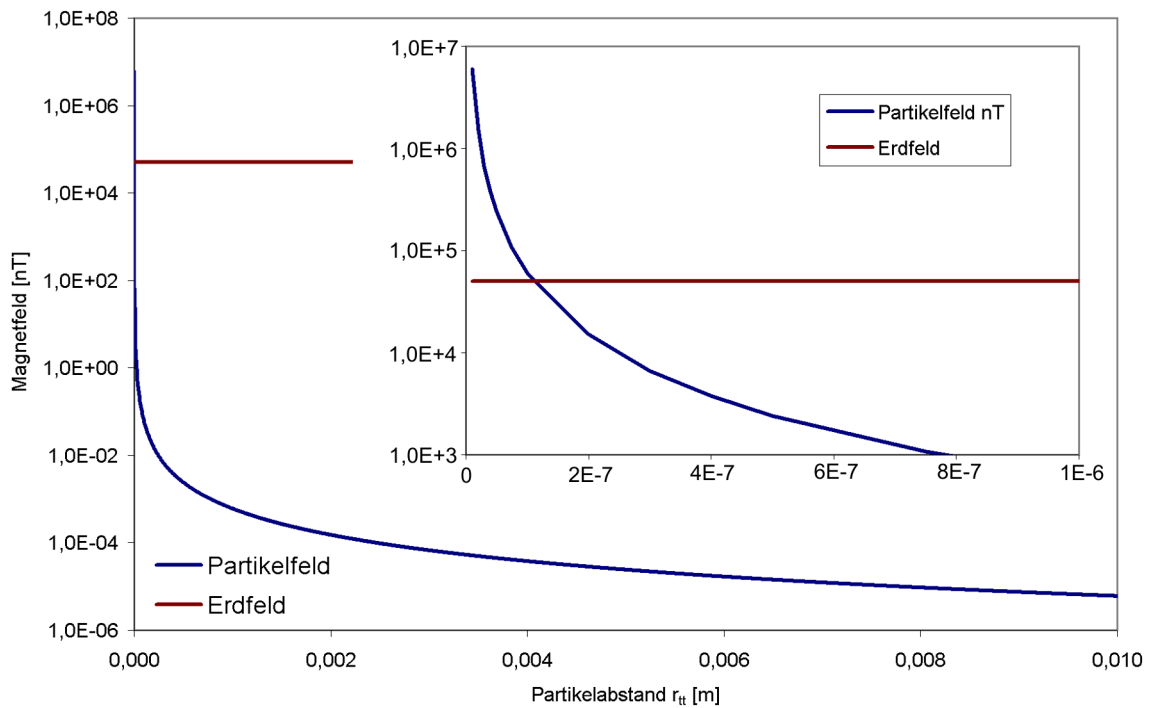


Abbildung 4.13: Vergleich Erdmagnetfeld zum Partikelfeld: Aufgetragen ist die Abhängigkeit der Stärke des Partikelfeldes vom Abstand der Partikel im Vergleich zum konstanten Erdmagnetfeld.

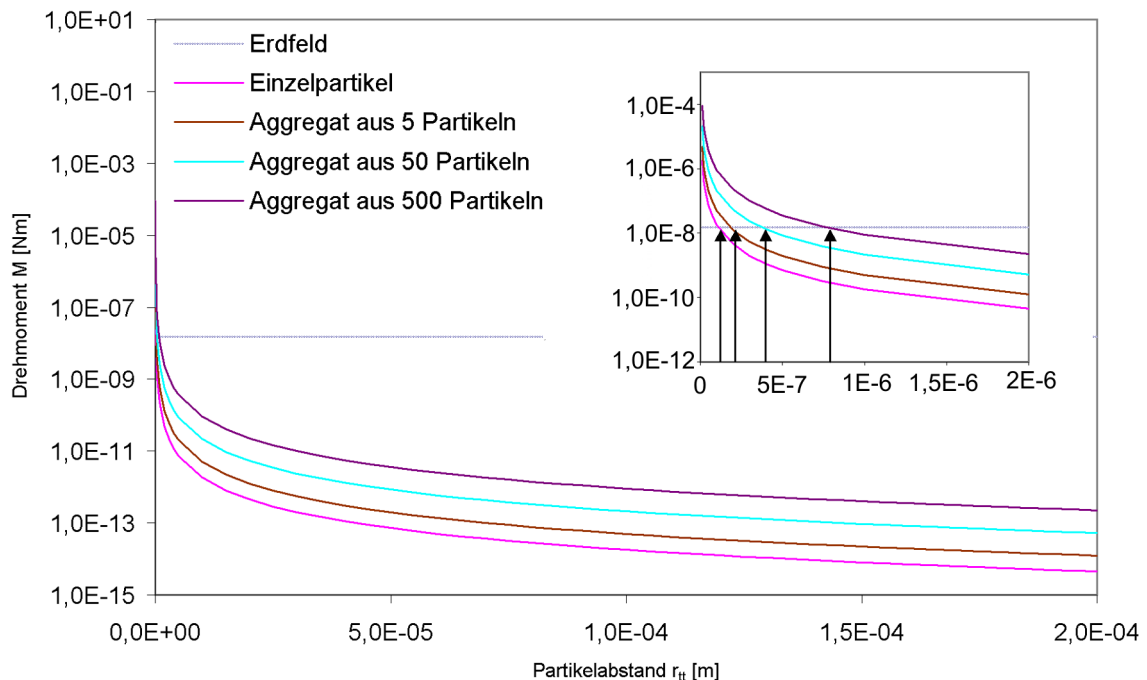


Abbildung 4.14: Vergleich der Drehmomentwirkung des Erdfeldes mit der Wirkung des Partikelfeldes: Die einzelnen Kurven repräsentieren jeweils das Drehmoment, daß auf ein Einzelpartikel der Magnetisierung $M_t = 3Am^2$ ausgeübt wird. Der Ausschnitt vergrößert den Bereich in dem die Kurven der Partikel die Kurve des Erdmagnetfeldes schneiden.

4.5 Abschätzung störender Felder

4.5.1 Das Erdmagnetfeld auf Beispielflughbahnen

Der größte Teil des störenden Magnetfeldes bildet das Erdmagnetfeld. Um den Einfluß des Erdmagnetfeldes auf den Ablauf des Aggregationsprozesses abzuschätzen zu können, muß zunächst einmal die Stärke des Feldes im Versuchsraum ermittelt werden. Die Parabelflüge selber werden von Bordeaux aus über dem Golf von Biskaya beziehungsweise bei schlechten Wetterbedingungen auch über dem Mittelmeer zwischen der französischen Küste und Korsika durchgeführt. Dabei wird nicht auf vorgegebenen Routen geflogen, sondern je nach Wetterlage ein geeignetes Gebiet genutzt. Deshalb ist eine Vorberechnung der auftretenden Störungen aufgrund des Erdmagnetfeldes nicht möglich (zu den Parabelflügen siehe auch Kapitel 3.2). Abb. 4.15 zeigt die Trajektorie der Flüge, die im Rahmen der studentischen Parabelflugkampagne der ESA im Jahre 2002 durchgeführt worden sind.

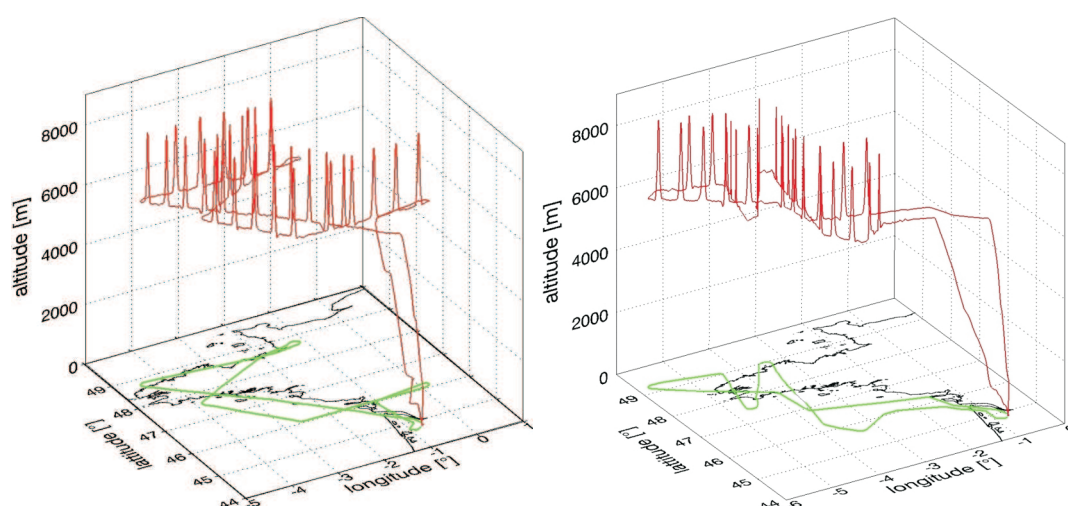


Abbildung 4.15: Flugrouten der Parabelflüge der studentischen Parabelflugkampagne der ESA 2002 (Die Höhenachse ist dabei stark überzeichnet): ESA-Flüge Nummer 156 vom 11.09.2002 und Nummer 157 vom 12.09.2002. Die grüne Projektion der Trajektorien verdeutlicht die Flugroute. Man erkennt jeweils den Start und die Landung in Bordeaux. Die Flüge führen nach dem Start zunächst während der Aufstiegsphase über den Atlantik. Nach dem Erreichen eines geeigneten Fluggebietes beginnt der Pilot mit den Parabeln. Nach Gruppen von jeweils fünf Parabeln wird ggf. die Richtung angepaßt. Wie man erkennen kann, werden die Flüge überwiegend über dem Meer durchgeführt.

Der Betrag des Erdmagnetfeldes liegt in diesen geographischen Breiten bei etwa 46.000 nT, wobei etwa 22.000 nT auf die Nordkomponente, 44.000 nT auf die Vertikalintensität und 900 nT auf die Ostkomponente entfallen. Weitere Störfelder, die von der Flugzeugelektrik und weiteren Störquellen wie anderen Experimenten an Bord herrühren können, liegen in der Regel vom Betrag her wesentlich unter dem des Erdmagnetfeldes.

4.5.2 Störfelder im Parabelflugzeug

Nicht nur das Erdmagnetfeld selbst, sondern auch andere Störfelder beeinflussen den Aggregationsprozeß. Neben dem Magnetfeld der Erde existieren weitere mögliche Störquellen im Flugzeug. Die Elektronik des Flugzeugs, die 28V-Gleichspannungversorgung an Bord, mögliche andere Experimente in der Nähe des Experimentierstandortes und nicht zuletzt Verzerrungen des Erdmagnetfeldes durch magnetische Komponenten des Flugzeuges selber stören das reine Erdmagnetfeld. Um einen grundsätzlichen Eindruck von den Größenordnungen der Magnetfeldstörungen an Bord des Parabelflugzeuges zu bekommen, wurde eine Messung an Bord während des Fluges durchgeführt. Diese kann nur als Beispiel für den Feldverlauf während dieses Parabelfluges angenommen werden, da wie oben erwähnt, bei jedem Flug eine andere Route geflogen wird und andere Experimente an Bord sind. Jedoch ist damit der Feldverlauf während des Fluges zumindest abzuschätzen. Abbildung 4.16 zeigt einen Teil dieser Messung.

Für die Messung wurde eine Konfiguration von zwei Magnetometern gewählt, die in verschiedenen Höhen innerhalb des Passagierraumes des Flugzeuges montiert waren. Dabei befand sich ein Sensor am Flugzeugboden (Sensor 2), der zweite in einer Höhe von etwa einem Meter (Sensor 1). Mit dieser Anordnung können auch Rückschlüsse über Verzerrungen des Feldes durch den Flugzeugkörper gezogen werden. Sensor 1 ist etwa in der Höhe montiert, auf der sich in den späteren Flügen die Vakuumkammer, in der die Experimente stattfinden, befindet (zum Experimentaufbau siehe Kapitel 5.1). Abbildung 4.16 zeigt den Betrag des Magnetfeldes während der ersten 11 Minuten des Parabelfluges. Die Komponenten des Magnetometers waren dabei so ausgerichtet, daß die B_x -Komponente der Flugzeugachse in Richtung zum Cockpit, die B_y -in Flügelrichtung und die B_z -Komponente zum Flugzeugboden ausgerichtet war. Die Anordnung entsprach einem rechtshändigen Koordinatensystem.

In der Abbildung können mehrere Störfaktoren erkannt werden: Der größte zu erkennende Störfaktor ist das Erdmagnetfeld selber mit einem Betrag von ungefähr 46.000 nT, der bereits zu Beginn der Messung das wesentlich kleinere Rauschen dominiert. Nach 143 Sekunden erfolgt ein Einschaltvorgang, der einen Peak von beinahe 700 nT zusätzlich hervorruft (a). Ob es sich hierbei um die Bordelektronik oder um einen anderen Versuchsaufbau an Bord des Flugzeuges handelt, konnte im Nachhinein nicht mehr geklärt werden. Deutlich zu sehen ist die 0. Parabel⁸ bei ca. 270 Sekunden (b) während derer die Überlagerung des Erdfeldes mit einer periodischen Störung (c) beginnt, deren Herkunft ebenfalls nicht geklärt werden konnte. Nach dieser 0. Parabel werden die anderen Versuchsaufbauten an Bord eingeschaltet, wie an der Zunahme des Rauschens der Meßwerte zu erkennen ist (d). Die periodische Störung setzt sich während des ganzen Fluges fort, konnte aber in anderen Flügen nicht reproduziert werden, so daß es sich vermutlich um eine Störung durch einen anderen Versuchsaufbau, der nur in diesem Flug an Bord war, handelt. Die Variationen des Betrages des gemessenen Magnetfeldes sind mit etwa 1.000 nT bzw. 3.000 nT relativ gering im Verhältnis zum Gesamtfeld von etwa 46.000 nT. Die

⁸Wie in Kapitel 3.2 erwähnt wurde, wird zu Beginn des Fluges eine Parabel geflogen, in der keine Experimente stattfinden, um den Personen, die das erste Mal an Bord sind, eine Möglichkeit zur Eingewöhnung zu geben.

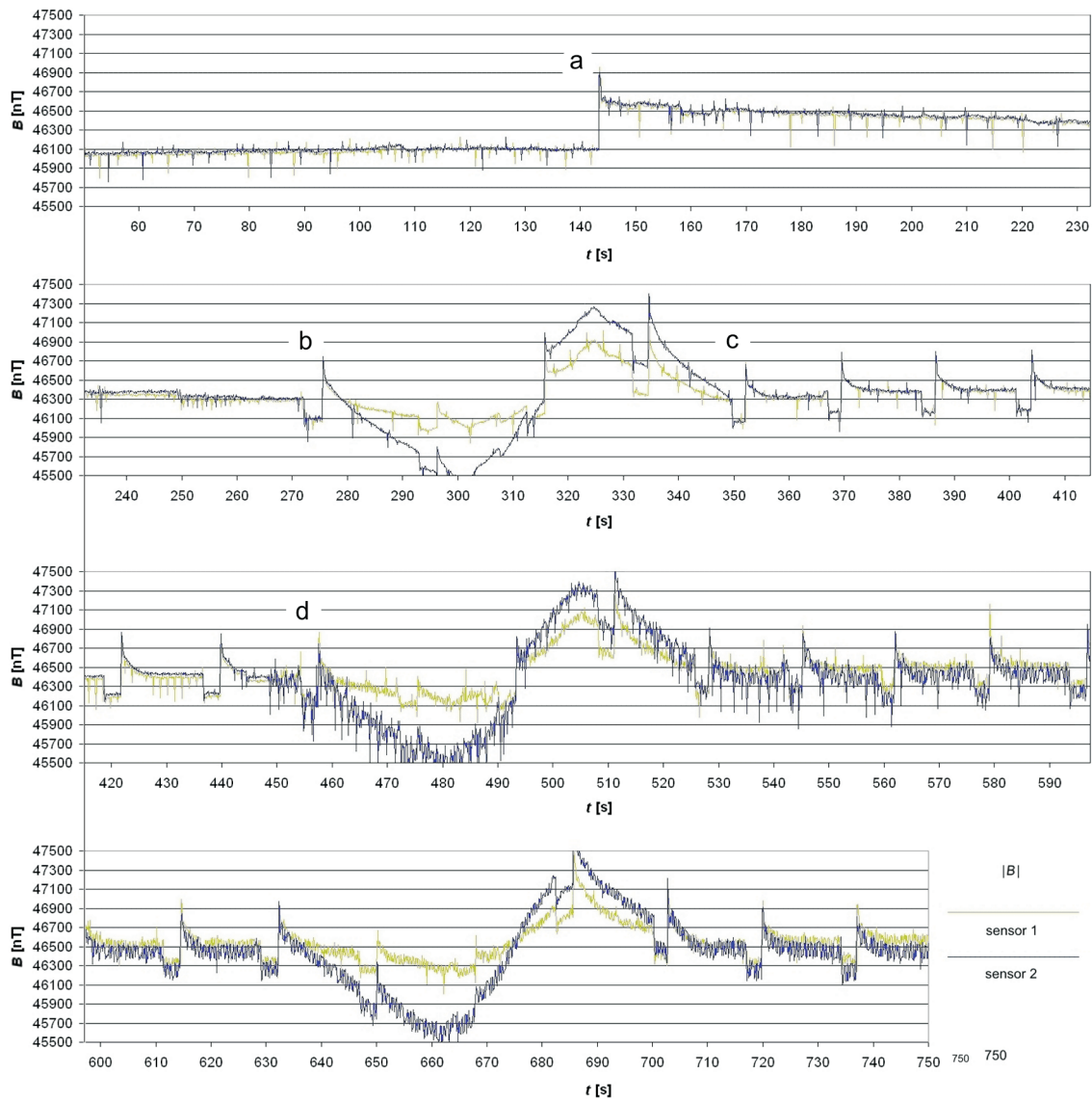


Abbildung 4.16: Messungen des Magnetfeldes während eines Parabelfluges, durchgeführt während der fünften studentischen Parabelflugkampagne der ESA im September 2002. Die Grafik zeigt den Verlauf des Betrages des lokalen Magnetfeldes an Bord des Flugzeuges beginnend wenige Sekunden nach dem Einschalten des Bordstromnetzes. Aufgetragen sind die Meßkurven zweier in verschiedenen Höhen positionierter Magnetometer über der Zeit seit dem Einschalten des Bordstromnetzes. Bereits vor den 0. Parabel (b) erkennt man einen plötzlichen Anstieg des Feldes um etwa 700 nT (a). Dieser ist wahrscheinlich, ebenso wie die später auftretende periodische Störung (c) und das nach der 0. Parabel einsetzenden Rauschen (d), auf Einschaltvorgänge von Flugzeugkomponenten oder anderen an Bord befindlichen Experimenten zurückzuführen. Wie man erkennen kann schwanken die Feldwerte von Sensor 1 zwischen 46.000 und 47.000 nT, von Sensor 2 zwischen 45.000 nT und 48.000 nT, was auf die Auf- und Abbewegung des Flugzeuges während der Parabelbahn zurückzuführen ist. Hier sind nur die 0., die 1. und die 2. Parabel aufgetragen.

größten Variationen rühren von der Änderung der Flughöhe her, da das Erdfeld mit

$$|B| = |B_0| \cdot \frac{r_E^3}{r^3} \quad (4.14)$$

in erster Näherung höhenabhängig abnimmt. Bei einer Höhenvariation während des Durchfluges durch eine Parabel von etwa 3000 m (siehe Abbildung 3.4) sind die Variationen von 2.000 nT erklärbar. Die Variationen der einzelnen Komponenten B_x , B_y , und B_z sind jedoch aufgrund der wechselnden Stellung des Flugzeuges am Himmel (siehe Kapitel 3.2) um einiges größer. Da die angedachte Kompensation der Störfelder komponentenweise arbeitet, ist es entscheidend, wie groß die Variationen der Komponenten ausfallen, um diese einzeln zu kompensieren. Abbildung 4.17 zeigt die einzelnen Komponenten des gemessenen Magnetfeldes während einiger ausgewählter Parabeln.

Den größten Gradienten zeigt die B_z -Komponente der Magnetometer mit einem Abfall von ca. 20.000 nT auf knapp -45.000 nT über die Zeit von 20 Sekunden. Dieser Abfall ist somit die stärkste Schwankung, die eine Kompensation ausgleichen muß. Da diese Änderung über ca. 20 s geschieht und das Feld während der Kompensation möglichst unter 5 nT liegen sollte, wie in Kapitel 4.4 bereits berechnet wurde, müßte eine geeignete Kompensation nach

$$\nu = \frac{45.000 \text{ nT}}{5 \text{ nT} \cdot 20 \text{ s}} \quad (4.15)$$

mit einer Frequenz von $\nu \approx 600$ Hz arbeiten, was technisch mit Schwierigkeiten behaftet ist.

4.5.3 Vergleich der gemessenen Felder mit modellierten Feldern

Die im Flugzeug gemessenen Daten sollen im Folgenden mit aus einem Modell gewonnenen Daten für das zu erwartenden Magnetfeld verglichen werden. Dazu wurden Positionsdaten, die während des Fluges vom Begleitpersonal aufgezeichnet wurden (siehe auch Kapitel 4.5.1) verwendet. Es standen sowohl geographische Breite und Länge als auch die Flughöhe des Flugzeuges zur Verfügung. Mit diesen Daten wurde das Erdmagnetfeld an der Flugzeugposition mittels eines Programms (Grosser 2004) modelliert. Das Programm modelliert das Erdfeld an beliebigen Positionen mit Hilfe von Kugelfunktionsentwicklung und verwendet als Basisdaten dazu das IGRF 2000⁹.

Das Ergebnis der Modellierung ist in Abbildung 4.18 zu erkennen. Sie zeigt den Betrag des berechneten Erdmagnetfeldes im Vergleich zu den Beträgen der von den beiden Magnetometern gemessenen Magnetfelder an Bord des Flugzeuges. Neben den bereits

⁹Das International Geomagnetic Reference Field ist ein Satz von Parametern für die Kugelfunktionsentwicklung. Es wird alle 5 Jahre auf der Grundlage von Messungen des Erdmagnetfeldes von der International Association of Geomagnetism and Aeronomy neu festgelegt und spiegelt die jeweils zu dieser Epoche angenäherte Feldentwicklung wider.

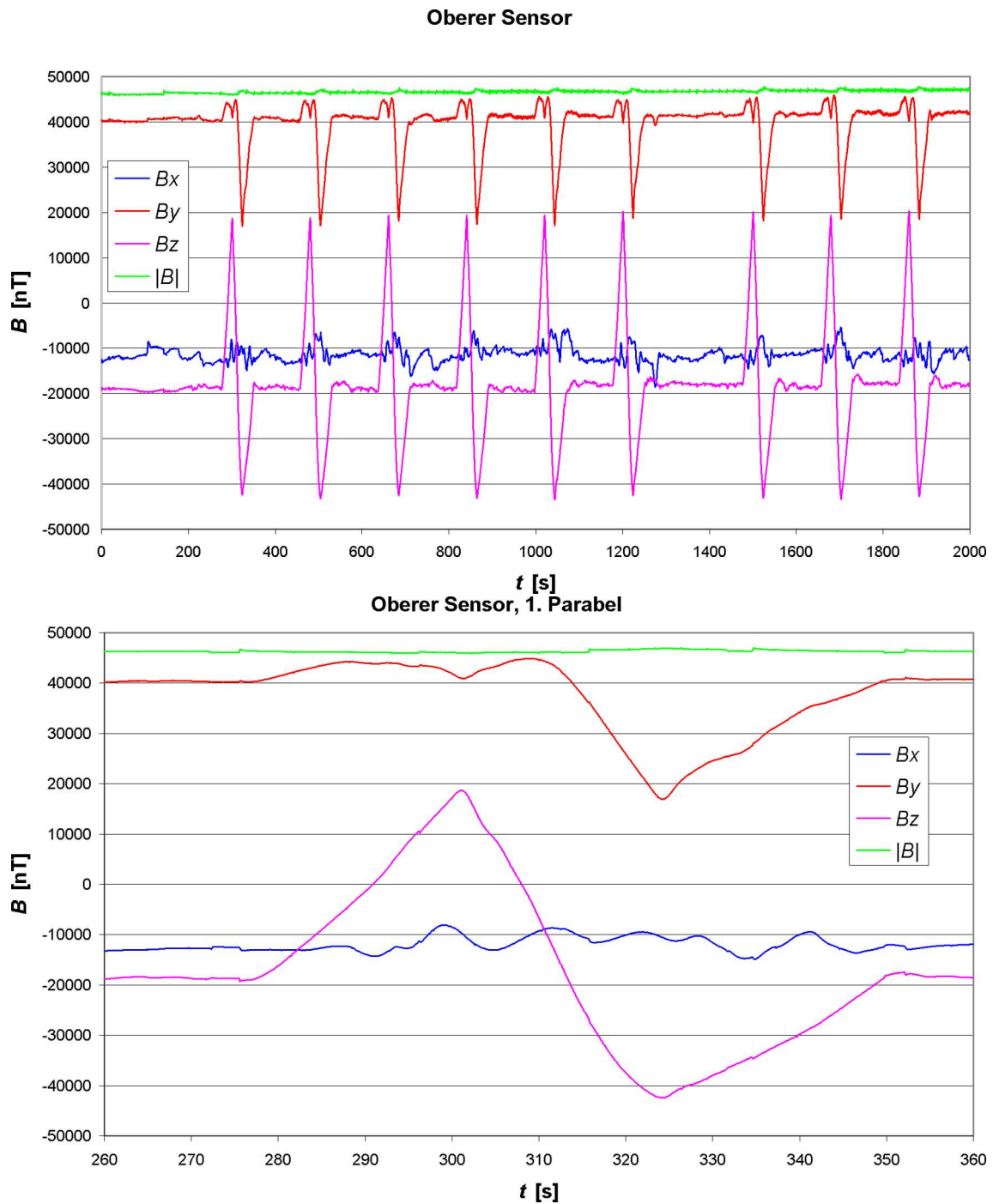


Abbildung 4.17: Komponenten des an Bord des Parabelflugzeugs gemessenen Magnetfeldes: Die obere Abbildung zeigt von den ersten neun Parabeln des Fluges Vol. 156 jeweils den Betrag $|B|$ sowie die Komponenten B_x , B_y und B_z . Man erkennt die geringen Schwankungen des Betrags von B , dagegen aber auch die stark schwankenden Einzelkomponenten. Um diese besser erfassen zu können, wurden die Meßwerte der ersten Parabel im unteren Teil der Grafik vergrößert aufgetragen. Man erkennt in dieser Grafik die extremen Änderungen, die insbesondere die z -Komponente des Magnetfeldes während einer Parabel erfährt.

erwähnten Störungen durch andere Experimente und den Flugzeugkörper sowie dem allgemeinen Rauschen (siehe Kapitel 4.5.2) paßt sich der Verlauf des gemessenen Feldes des Sensors 1 (grün) recht gut an das berechnete Feld (blau) an. Die abweichenden Schwankungen des Sensors 2 (violett) erklären sich aus seiner Positionierung am Flugzeugboden und damit in größerer Nähe zu potentiellen Störquellen. Die Schwankungen während der Parabeln fallen in den modellierten Daten wesentlich geringer aus, was auf eine Verzerrung der gemessenen Felder durch magnetische Materialien in der Nähe der Sensoren schließen läßt.

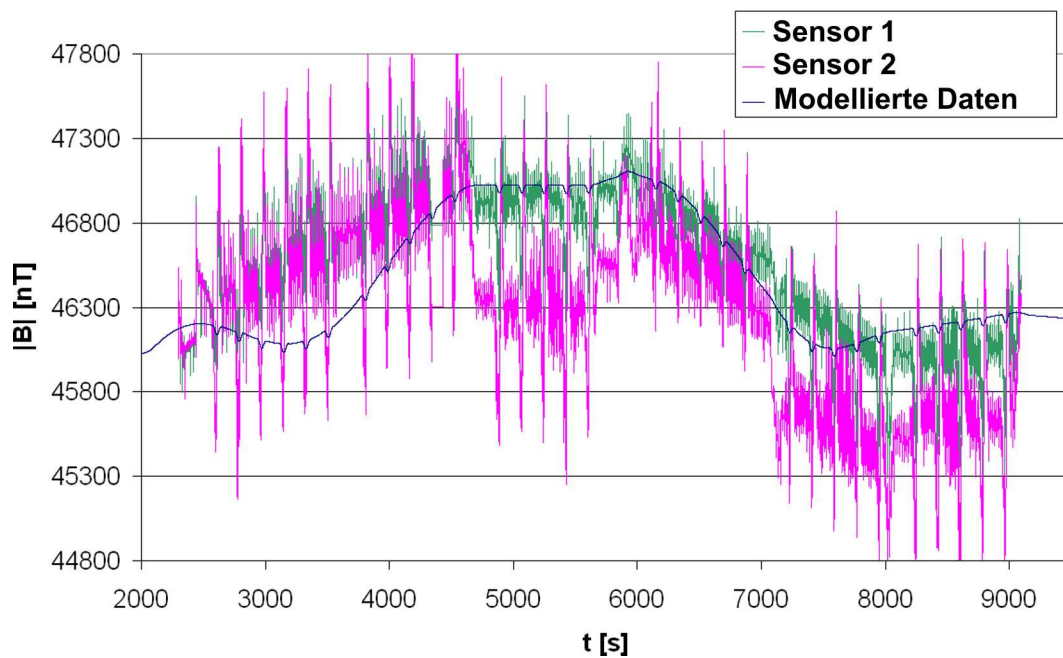


Abbildung 4.18: Vergleich der Magnetfeldmessungen mit theoretischen Berechnungen des Feldes: Die blaue Kurve repräsentiert den modellierten Betrag des Erdmagnetfeldes auf der geflogenen Trajektorie. Violette und grüne Kurven zeigen den gemessenen Verlauf des Betrages des Magnetfeldes.

4.6 Erzeugung und Kompensation von Magnetfeldern

Die in Kapitel 4.5 erläuterten Störungen sollen durch geeignete Maßnahmen verhindert werden. Erste Überlegungen, die magnetischen Störfelder mittels einer Ummantelung aus MU-Metall¹⁰ abzuschirmen, wurden relativ schnell verworfen, weil bereits bei der Planung technische Probleme auftraten: Da der Versuchsraum - die Vakuumkammer, siehe auch Kapitel 5.1.1 - von mehreren Seiten zugänglich sein muß, wäre eine magnetische Schirmung unpraktikabel, weil zu viele Öffnungen zur Bedienung und Beobachtung gelassen werden müßten. Weiterhin würde eine Abschirmung zwar die störenden Einflüsse der externen Felder ermöglichen, nicht aber die Untersuchung der Aggregationsvorgänge

¹⁰MU-Metall ist eine Legierung, die Magnetfelder komplett abschirmen kann.

unter definierten Magnetfeldbedingungen mit höheren Feldern. Daher wurde entschieden, die magnetischen Störfelder durch eine dynamische, aktive Kompensation zu beeinflussen.

4.6.1 Homogenitätsbereiche von Spulensystemen

Um eine grobe Abschätzung der nötigen Dimensionen des Spulensystems zu erhalten, wird im Folgenden der Homogenitätsbereich eines Helmholtzspulenpaares¹¹ betrachtet. Als homogen wird hier der Bereich innerhalb des Spulenpaares bezeichnet, in dem das resultierende Magnetfeld innerhalb der gewünschten Parameter liegt. Für unser Experiment bedeutet das, daß das Spulensystem in der Lage sein sollte, das Feld innerhalb des Experimentierraums konstant unterhalb eines definierten Wertes zu halten. Günstigenfalls liegt dieser Wert bei ca. 5 nT (siehe Kapitel 4.4). Für das von einem Helmholtzspulenpaar erzeugte Magnetfeld gilt (Auster 2002):

$$B = \frac{c \cdot N_{Sp} \cdot I}{r_{Sp} \cdot \mu_0} \cdot \left(\left(1 + \left(\frac{r}{r_{Sp}} + 0,5 \right)^2 \right)^{-\frac{2}{3}} + \left(1 + \left(\frac{r}{r_{Sp}} - 0,5 \right)^2 \right)^{-\frac{2}{3}} \right) \quad (4.16)$$

Wobei N_{Sp} die Windungszahl der Spulen, r_{Sp} der Radius der Spulen, I der durch die Spulen fließende Strom, und r der Abstand der Meßposition vom Zentrum der Spulen ist. Für ein Spulenpaar gilt hier die Konstante $c = 62,83$. Mit dieser Gleichung ist es möglich, den Homogenitätsbereich von verschiedenen Spulenkonfigurationen zu berechnen. Abbildung 4.19 zeigt Feldverläufe von Spulen mit verschiedenen Parametern.

Deutlich zu erkennen ist die Abhängigkeit des Feldverlaufs vom Radius der verwendeten Spulen: Je größer der Radius, desto flacher wird der Feldverlauf im unteren Teil der Kurven. Entscheidend für die Experimente ist ein möglichst homogener Feldverlauf im Experimentierbereich, der sich durch einem möglichst flachen Verlauf auszeichnet. Die von uns verwendete und in Kapitel 5.1.1 beschriebene Vakuumkammer und die Anordnung von Magnetometern (siehe Kapitel 5.2.1) erfordern einen Homogenitätsbereich von mehr als 10 cm. Dieser ist in der oberen Grafik von Abbildung 4.19 eingetragen. Der oben erwähnte optimale Wert für das kompensierte Feld liegt bei einem Promille des Erdfeldes. Spulenradien unter 40 cm erreichen diesen Wert kaum, auch größere Radien liegen nur knapp darunter, wie man Abbildung 4.19 entnehmen kann. Für unseren Fall sollte der Radius des verwendeten Spulensystems mindestens 80 cm betragen.

Für ein Kompensationssystem wird für jede Raumrichtung ein Spulenpaar verwendet, so daß die erzielbare Kompensationsleistung gegebenenfalls noch besser sein kann.

¹¹Bei einem Helmholtzspulenpaar handelt es sich um zwei Ringspulen, die im Abstand ihrer Radien aufgestellt sind.

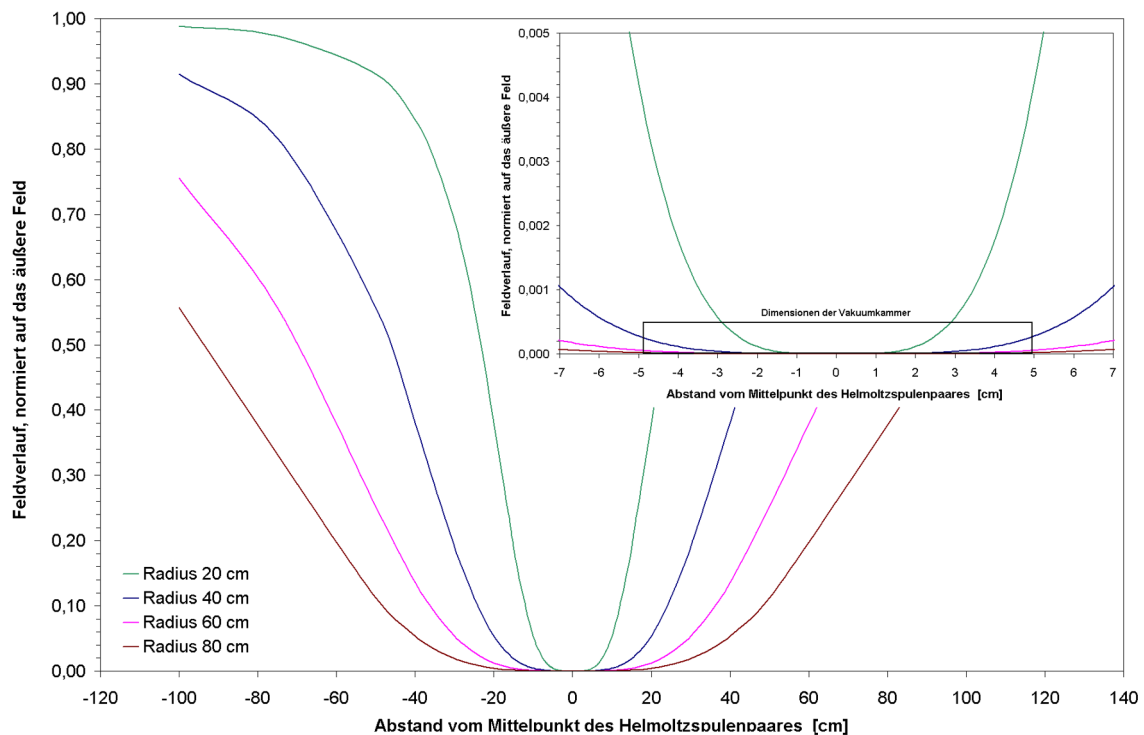


Abbildung 4.19: Homogenitätsbereich von Spulensystemen: Die Kurven zeigen den relativen Feldverlauf eines Helmholtzspulenpaares in Abhängigkeit vom Spulenradius. Man erkennt, daß der Homogenitätsbereich der einzelnen Konfigurationen extrem von der Wahl des Spulenradius abhängig ist. Bei einem Durchmesser des Experimentierraums von mehr als 10 cm (siehe Kapitel 5.1.1), einem Störfeld von ca. 50.000 nT und einem erwünschten Feld von etwa 5 nT ist ein Spulenradius von mindestens 60, besser noch von 80 cm geeignet.

5 Versuchsaufbau und Durchführung der Experimente

Hauptaufgabe der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Untersuchung von magnetischen Aggregationsphänomenen unter verschiedenen magnetischen Umgebungsbedingungen. Dazu wurde der bestehende Experimentaufbau des in Kapitel 4.1 beschriebenen ADAM-Experimentes verbessert und erweitert. Die daraus entwickelten Folgeexperimente wurden ADAM+EVE und CAIN+ABEL genannt. Das folgende Kapitel beschreibt die Aufbauten und Verbesserungen am Experiment und beleuchtet die einzelnen Komponenten, aus denen der Aufbau besteht.

5.1 Grundkomponenten

5.1.1 Das Vakuumsystem

Die Vakuumkammer

Die für alle Experimente genutzte Vakuumkammer basiert auf einem Entwurf, der für vorbereitende Laborexperimente zum CODAG-Experiment¹ (Blum et al. 1999) entwickelt wurde. Es handelt sich um eine zylinderförmige Kammer von 10 cm Innendurchmesser und 10 cm Höhe aus Aluminium. An zwei Seiten sowie am abnehmbaren Deckel der Kammer befinden sich Glasfenster von 40 mm beziehungsweise 65 mm Durchmesser, die zur Beleuchtung (siehe Kapitel 5.1.3) und zur Beobachtung - direkt oder mittels eines Mikroskops (siehe Kapitel 5.1.3) - genutzt werden können. Vier KF16-Anschlüsse² ermöglichen die Verbindung von Pumpe, Druckmeßgerät, Belüftungsventil und anderen Vakuumkomponenten. Ein großer KF40-Flansch ermöglicht den Anschluß des Staubdispersionapparates (5.1.2). Als Bodensegment der Kammer existieren verschiedene Bauteile. Hier wird eine Version mit Drehdurchführung verwendet, um den im folgenden Kapitel beschriebenen Probensammelmechanismus bedienen zu können.

Probensammelmechanismus

Um die während eines Experimentes entstandenen Aggregate einer späteren Untersuchung zuführen zu können, ist es sinnvoll, sie nach der Mikrogravitationsphase aufzu-

¹COsmic Dust AGgregation - ein Experiment zur Erforschung von Aggregationsphänomenen des Astrophysikalischen Institutes der Universität Jena, das 1998 mit dem Spaceshuttle flog.

²Kleinflansch 16 mm.

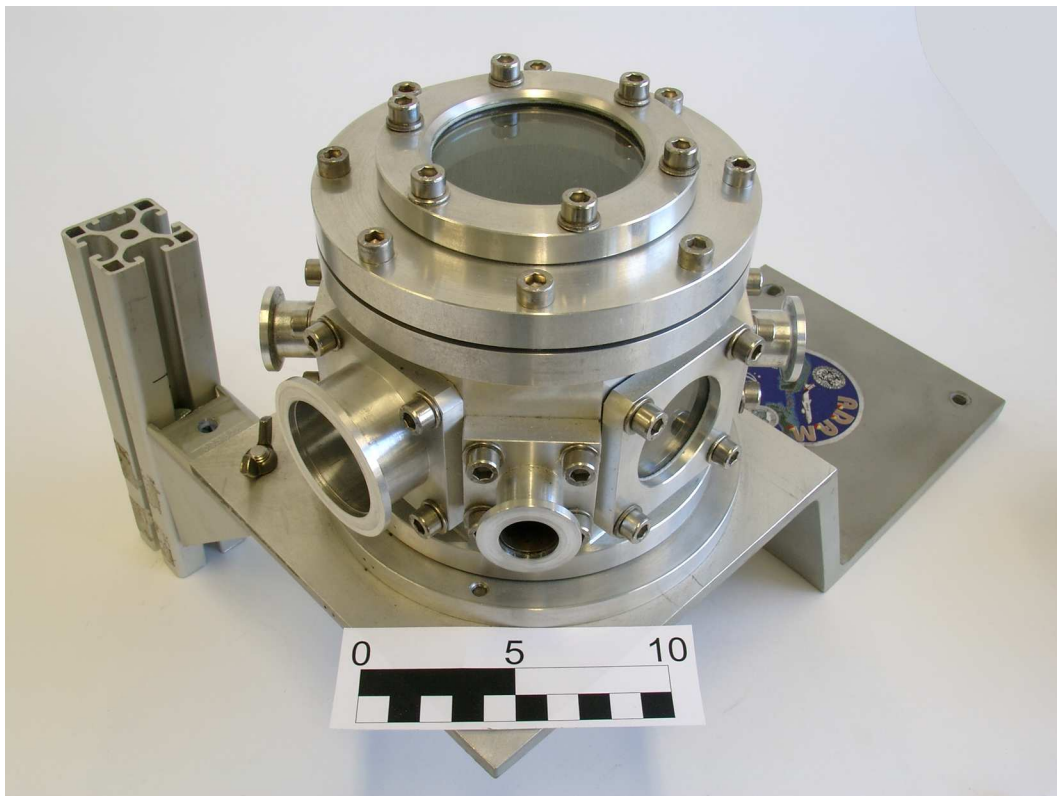


Abbildung 5.1: Die Vakuumkammer

fangen. Für diesen Zweck wurde in den Boden der Vakuumkammer ein Auffangsystem integriert, das es ermöglicht, Aggregate von bis zu acht aufeinanderfolgenden Experimenten aufzufangen. Das System besteht aus einer Kapsel, die auf den im Kammerboden integrierten Drehmechanismus aufsetzt. Dieser Mechanismus ermöglicht es, eine in der Kapsel beweglich gelagerte Probenscheibe auf neun fest definierte Positionen zu schwenken. Die erste Position ist dabei die Einschußposition, in der die anderen Auffangpositionen durch eine Abdichtung gegenüber dem Versuchsraum vor Kontamination durch eingeschossene Partikel geschützt sind. Auf den übrigen acht Positionen können jeweils vier Objektträger positioniert werden, die in der Elektronenmikroskopie verwendet werden. Die Kapsel wird mittels einer Platte mit Bajonettverschluß am Kammerboden befestigt (siehe Abb. 5.2).

Das System wurde so entworfen, daß die Probenkapsel innerhalb der acht Minuten andauernden Pause zwischen den Parabeln 15 und 16 (siehe Abbildung 3.5 in Kapitel 3.2) ausgetauscht werden konnte. Es wurden insgesamt sechs Kapseln gebaut, um während dreier Parabelflügen je zwei Kapseln zu nutzen und jeweils acht Experimente durchzuführen.

Nachdem die Teilchen während der Mikrogravitationsphase aggregiert sind, sinken sie in der Hypergravitationsphase zu Boden, da die Beschleunigung in dieser Phase senkrecht zum Flugzeugboden wirkt (siehe Kapitel 3.2). Durch einen Ausschnitt in der Befestigungsplatte kann ein Teil der Aggregate auf die darunter liegenden Mikroskopobjektträ-

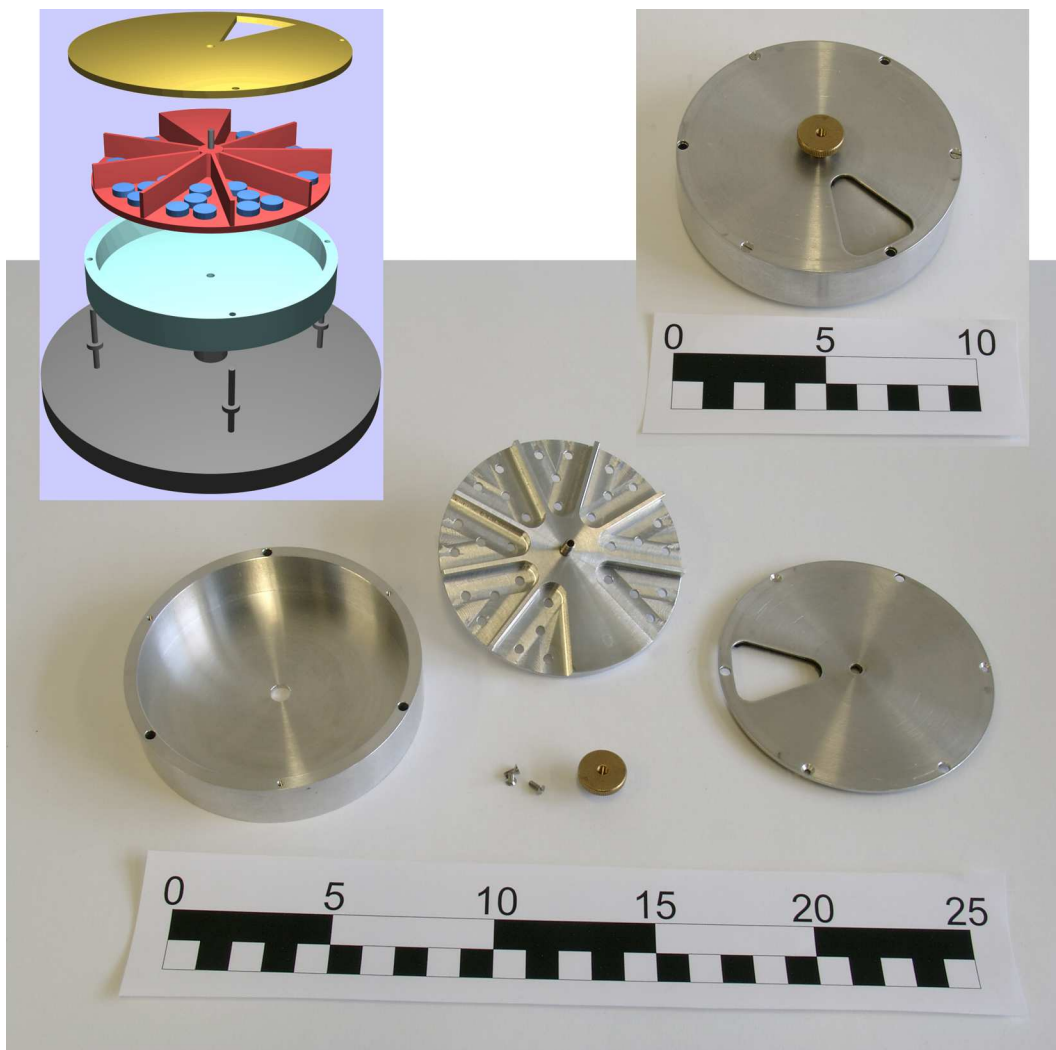


Abbildung 5.2: Probenkapsel mit Probensammelmechanismus: Das linke, obere Bild zeigt eine schematische Abbildung der Kapsel: Eine drehbare Scheibe mit acht Sammel- und einer Einschussposition ist in einer kleinen Dose gekapselt. Eine Aussparung im Deckel der Dose ermöglicht es den gewachsenen Aggregaten, während der Hypergravitationsphase auf den auf der drehbaren Scheibe montierten Mikroskopobjektträger zu sedimentieren. Es steht dazu jeweils eine von acht Positionen zur Verfügung, die durch Drehen unter der Aussparung positioniert werden muß. Die Abbildung oben rechts zeigt die fertig montierte Kapsel, während das untere Bild die Einzelteile wiedergibt.

ger fallen. Dort werden sie durch Adhäsionskräfte so weit fixiert, daß sie auch nach den Experimenten durch Erschütterungen zum Beispiel beim Transport ihre Position nicht verändern (Nübold 2001).

Pumpe und Vakuumsystem

Die Vakuumkammer kann mit Hilfe einer ölfreien Scrollpumpe des Typs SH01001UNIV der Firma Varian evakuiert werden. Die Vermeidung von ölgeschmierten Pumpen war

notwendig, um zu vermeiden, daß Öl aus der Pumpe austritt und in die Entgasungsleitung des Flugzeuges gelangt. Die Vermischung mit Abgasen anderer Experimente hätte zur Bildung von explosiven Gemischen führen können.

Mit der Pumpe ist es möglich den Kammerdruck unter den Anzeigebereich des in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Druckmeßgerätes zu senken. Da dieser bei 10^{-3} hPa lag und der Einschub mittels des Staubdispergierungsapparates einen Druck von 1 bis 3 hPa liefert (siehe Kapitel 5.1.2), ist die Pumpe für unsere Zwecke ausreichend.

Um ein vielfaches Ein- und Ausschalten der Pumpe während der Parabelflüge zu verhindern, ist sie durch ein Ventil von der Vakuumkammer getrennt, das zum Evakuieren jeweils nur geöffnet und geschlossen wird. Ein dauerhaftes Pumpen ist nicht möglich, da die eingeschossenen Partikel sofort aus der Kammer herausgesaugt würden.

Kammer, Ventile und Pumpe sind mit Metallvakuumschläuchen mit einem Durchmesser von 3 cm bzw. 2 cm verbunden. Um die Kammer zum Wechseln der Probenkapsel zu öffnen, ist eine Möglichkeit zur Belüftung des gesamten Vakuumsystems zwingend erforderlich. Dazu ist ein Belüftungsventil an der Kammer angebracht. Zum Belüften wird das Pumpenventil geschlossen und dann das Belüftungsventil geöffnet. Nach einer Belüftung benötigt die Pumpe circa 2 Minuten, um wieder einen geeigneten Versuchsdruck von unter einem hPa herzustellen.

5.1.2 Staubdispergierung

Um die in Kapitel 4.2 beschriebenen, verschiedenen Staubsorten geeignet in die Kammer zu dispergieren, existieren grundsätzlich drei unterschiedliche technische Möglichkeiten: Die rein mechanische und die pyrotechnische Dispergierung werden im Folgenden beschrieben. Die dritte Möglichkeit der Dispergierung mittels Ultraschall wurde aufgrund technischer Schwierigkeiten nicht weiter verfolgt. Bei den einzelnen Methoden ist zu beachten, daß das Dispergieren von magnetischen Partikeln aufgrund der höheren magnetischen Kräfte verglichen mit den Adhäsionskräften bei nicht magnetischen Partikeln weitaus schwieriger ist. Wünschenswertes Ergebnis der Dispergierung ist eine gleichmäßig in der Vakuumkammer verteilte Wolke aus Einzelpartikeln.

Mechanische Staubdispergierung

Ein Ansatz der rein mechanischen Dispergierung des Staubes geht von einem rotierenden Zahnrad aus (Poppe et al. 1997). Auf die Stirnseite dieses Rades wird mit einem Kolben aus einem Loch der Staub gepreßt. Die rotierende Bewegung des Rades deagglomeriert den Staub und beschleunigt ihn in Richtung der Rotation tangential. Auf diese Weise entsteht ein relativ dichter und gerichteter Staubstrahl, der vor dem Erreichen der gegenüberliegenden Kammerwand abgebremst werden muß. Dies erfolgt mittels eines vor den Experimenten berechneten, definierten Kammerinnendruckes. Dieser liegt bei der Größe und Masse der verwendeten Partikel (siehe 4.2) bei wenigen hPa bis etwa 10 hPa, wodurch die Wahl des Druckes während der Experimente limitiert ist. Innerhalb dieses Staubstrahls

sind bei Verwendung von nichtmagnetischem Staub bereits erste Ansätze von Aggregation zu erkennen, so daß bereits kleine Aggregate den Versuchsraum erreichen.

Kombiniert man einen solchen Mechanismus mit großen Staubreservoirs und zusätzlich einem Revolvermechanismus, der das automatisierte Ausdrücken mehrerer Reservoirs erlaubt, so können mit diesem Gerät sehr große Staubmengen in kurzer Zeit in den Experimentierraum eingebracht werden. Man erreicht auf diese Weise Staabdichten von bis zu 10^{-4} kg/m³. Ein solches System wurde von Poppe (2000) konstruiert und gebaut und befindet sich im Einsatz für andere Aggregationsexperimente. Für die geplanten Experimente ist es weniger geeignet, da keine gleichmäßige Wolke sondern ein Staubstrahl erzeugt wird. Die oben erwähnte Agglomerationsrate im Strahl vor Eintritt in die Kammer wird bei magnetischen Partikeln aufgrund der anziehenden Kräfte untereinander außerdem wesentlich höher sein, was hier unerwünscht ist.

Pyrotechnische Staubdispergierung

Eine andere Möglichkeit, Staub in die Kammer zu dispergieren, ist die Verwendung von kleinen Mengen Sprengstoff, der zur Explosion gebracht wird. Die ausströmenden Oxidationsgase bilden eine Überschallströmung, die, wenn sie gerichtet ist, die einzelnen Partikel trennt und in den Versuchsraum befördert. Dabei erhält man nicht wie bei der Zahnradmethode einen Staubstrahl, sondern die Partikel werden aufgrund der Ausbreitung der Explosionsgase in der kompletten Vakuumkammer verteilt. Man benötigt dabei keinen vordefinierten Kammerdruck, und die ganze Kammer wird mit der Staubwolke ausgefüllt. Die entstehenden Gase sorgen allerdings für einen Drucksprung nach der Explosion in der Kammer, der in der bestehenden Bauform 3-4 hPa beträgt. Auch die Einbringung größerer Staubmengen ist aufgrund der technischen Konstruktionsmerkmale der sogenannten Staubkanone (s.u.) nicht möglich, was zu einer wesentlich geringeren Staabdichte als bei der Zahnradmethode führt.

Die Explosion und die damit verbundene hohe Temperatur ist kein Problem für die magnetisierten Partikel. Zwar liegt die Temperatur der Explosionsgase weit oberhalb der Curietemperatur des Bariumferrites von 723 K, doch haben Untersuchungen von Nübold (2001) gezeigt, daß dies keinen Effekt auf die Magnetisierung der Partikel hat. Ursache hierfür ist die kurze Zeitspanne, über die die heißen Explosionsgase auf die magnetischen Partikel einwirken.

Für die Konstruktion einer solchen Staubkanone wurden zwei verschiedene technische Ansätze gemacht, die beide auf der Verwendung von Pistolenzündhütchen basieren. Diese Zündhütchen werden normalerweise verwendet, um die Treibladung in Pistolen- oder Gewehrmunition zu zünden. Die Hütchen enthalten eine kleine Menge des Sprengstoffes Nitropenta ($C_4H_6N_4O_7$) und lassen sich normalerweise durch einen mechanischen Schlag mittels eines Schlagbolzens zur Zündung bringen. Ein solches Staubdispergierungsgerät wurde von Neuhaus (1999) konstruiert. Es basiert auf einem etwa einen Zentimeter durchmessenden Röhrchen, an dessen einem Ende das Zündhütchen eingesetzt wird. Von der anderen Seite wird der Staub eingefüllt. Danach wird die Öffnung des Röhrchens mit einer

dünnen Aluminiumfolie verschlossen, um das Herausfallen des Staubes zu verhindern. Bei der Explosion reißt diese Folie, und der Staub wird aus dem Röhrchen geschleudert.

Die ursprüngliche Version der Staubkanone war in der Lage einen einzigen Schuß abzugeben. Für die Verwendung während der Parabelflüge ist diese einschüssige Variante allerdings ungeeignet, da ein Hantieren mit Sprengstoffen und pulverförmigen Substanzen während der Flüge an Bord nicht erlaubt ist und somit ein Nachladen der Kanone nicht möglich ist. Poppe (2000) konstruierte aus dieser einschüssigen Version eine Variante, die in der Lage ist, bis zu acht Schüsse nacheinander zu feuern. Erreicht wird dies durch einen Revolvermechanismus, der mit acht Zündhütchen geladen wird, die jeweils eine kleine Portion Staub abfeuern. Zunächst wurde eine kompakte Version entwickelt, die jedoch aufgrund technischer Probleme mit der Federspannung nicht zuverlässig arbeitete. Eine erheblich größerer Version, die von Hand gespannt werden muß, arbeitet zuverlässig und wird als Ersatzgerät während der Flüge mitgeführt. Abbildung 5.3 zeigt diese beiden Geräte.

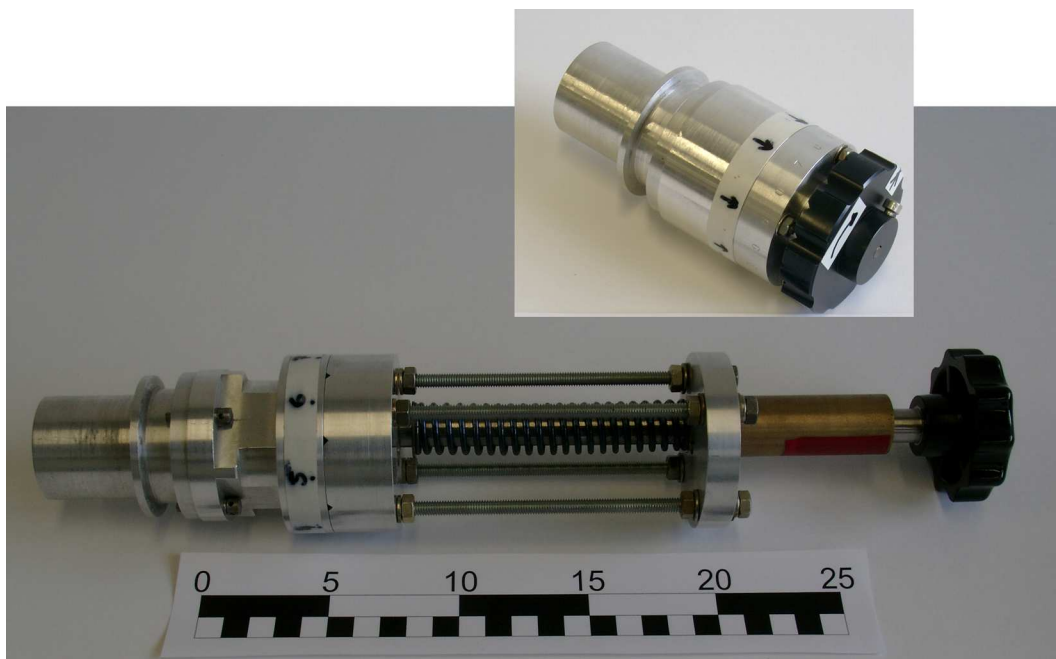


Abbildung 5.3: Mechanische Staubkanonen zur Staubdispergierung: Die untere, wesentlich größere Version wurde konstruiert, weil die kompakte obere Version nicht zuverlässig arbeitete. Beide Versionen arbeiten nach dem Schlagbolzenprinzip. Der von einer Feder getriebene Schlagbolzen trifft jeweils eines der in den Rohren platzierten Zündhütchen und löst damit den Einschuß aus.

Da sich besagte Zündhütchen nicht nur durch mechanischen Druck zünden lassen, sondern auch durch Wärme, lag der Schluß nahe, eine elektrische Version zu entwickeln. Der Schlagbolzen wurde durch einen Wolframstift ersetzt, der dauerhaft auf dem Rücken des Zündhütchens sitzt. Ein starker Stromstoß erzeugt genug Wärme, um das Zündhütchen zur Explosion zu bringen. Die elektrische Staubkanone feuert mit einer Zuverlässigkeit von 90%, so daß in die endgültige Version neun Schüsse integriert wurden, um für

eventuelle Ausfälle vorzusorgen. Als weitere Verbesserung wurde für die ADAM+EVE-Kampagne ein Vorsatz konstruiert, der sich vor die einzelnen Rohre der Staubkanone schrauben läßt. Der einzuschießenden Staub kann nun in diese Vorsätze eingefüllt werden. Er wird nun nicht mehr direkt in die Rohre eingefüllt, wo er die Leitfähigkeit der Zündhütchen verändert und damit den Stromfluß beeinflusst, was teilweise zu Fehlschüssen führt. Konstruktionszeichnungen dieser Vorsätze befinden sich in Anhang A.

Die elektrische Staubkanone ist auch in der Lage, automatisiert zu feuern, was aber an Bord des Flugzeuges nicht genutzt wurde. Ein weiterer Vorteil ist, daß in das Steuergerät eine Triggerfunktion integriert wurde, so daß ein Einschußsignal mit der Datenaufnahme (siehe Kapitel 5.2.1) registriert und abgespeichert werden kann. Abbildung 5.4 zeigt die elektrische Staubkanone und das angeschlossene Steuergerät.

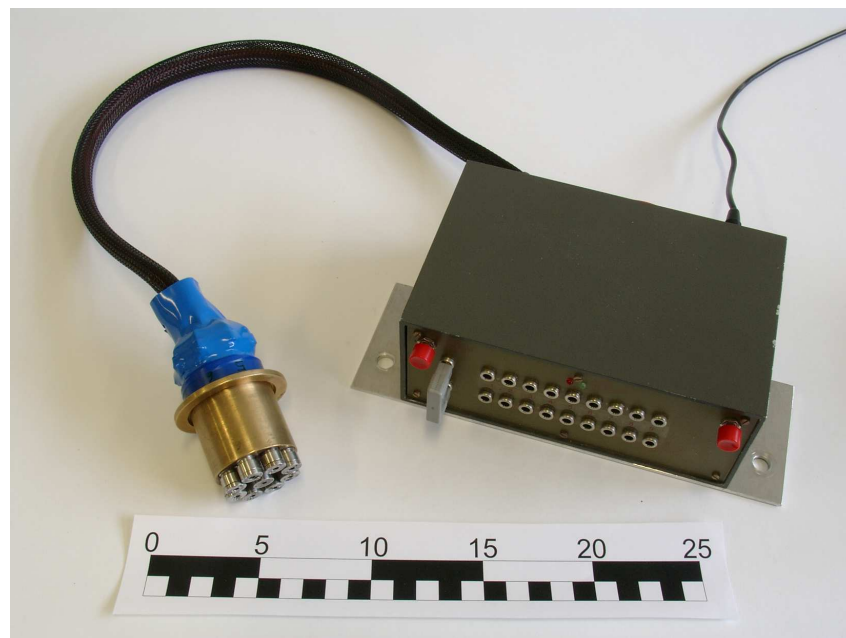


Abbildung 5.4: Elektrische Staubkanone zur Staubdispersion: Die wesentlich kompaktere Version der Staubkanone (links im Bild) wird mit Hilfe des Steuergerätes (rechts) bedient: Durch Vorwahl der Schußposition durch eine Kontaktbrücke kann jeweils eines der neun Rohre scharf gemacht werden. Aus Sicherheitsgründen erfolgt die Zündung erst beim Betätigen zweier (roter) Knöpfe um versehentliches Auslösen zu vermeiden.

Die Dispersionswirkung der elektrischen Staubkanone wurde im Vorfeld der Experimente anhand einer Versuchsreihe getestet. Wie man in Abbildung 5.5 erkennen kann, wird beim Einschuß der größte Teil der Partikel voneinander getrennt. Man erkennt auf dem Bild viele einzelne Partikel und nur vereinzelt einige Klumpen mit nicht vollständig deagglomerierten Teilchen. Der Test wurde mit magnetischem Bariumferrit durchgeführt, da die magnetischen Partikel aufgrund der zwischen ihnen wirkenden magnetischen Kräfte einer wesentlich höheren Haftung unterliegen als die verwendeten Silikat-Partikel. Dabei wurden Schüsse mit Bariumferritstaub unter normalen Schwerebedingungen auf einen Probenträger abgegeben und hinterher unter einem Lichtmikroskop untersucht. Der Staub

hatte nur weniger als eine Sekunde Zeit, zu aggregieren. Wie man sieht, liegt der größte Teil des Staubes in monodispersen Partikeln auf der Oberfläche des Probenträgers vor. Das spricht dafür, daß die meisten Partikel trotz der magnetischen Kräfte während des Einschusses voneinander getrennt wurden. Das Ergebnis des Testes läßt sich analog auf den Silikatstaub übertragen, da diese Partikel keine zusätzlichen magnetischen Haftkräfte erfahren.

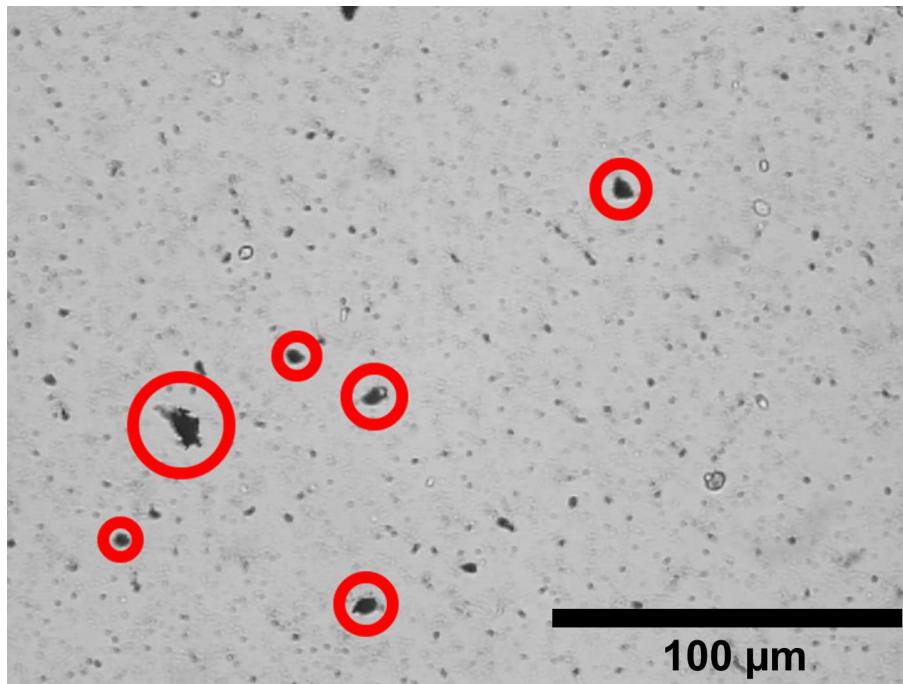


Abbildung 5.5: Test der Dispersionswirkung der Staubkanone: Es ist zu vermuten, daß die wenigen markierten Klumpen beim Einschuß nicht voneinander getrennt wurden, da ihre Struktur gänzlich von den in vorherigen Experimenten gefundenen Aggregaten abweicht.

5.1.3 Optische Geräte

Mikroskop

Für die *in-situ*-Beobachtung des Aggregationsprozesses wurde ein Mikroskop verwendet. Die Brennebene dieses Mikroskops mußte, im Gegensatz zu herkömmlichen Geräten, weit von der Optik entfernt liegen, damit das Mikroskop außerhalb der Kammer montiert werden kann. Man spricht von einem sogenannten langbrennweitigen Mikroskop. Mit dem QM100 der Firma Questar steht ein solches Gerät zur Verfügung (siehe Abbildung 5.6). Das Gerät hat einen Vergrößerungsfaktor von 6,5 und kann mit einer Vorsatzlinse ausgestattet werden, die den Vergrößerungsfaktor auf 8 verändert. Dabei verändert sich der Fokalabstand von 135 mm auf 95 mm. Das Mikroskop ist so angeordnet, daß es einen kleinen Bereich im Zentrum der Versuchskammer scharf abbildet.

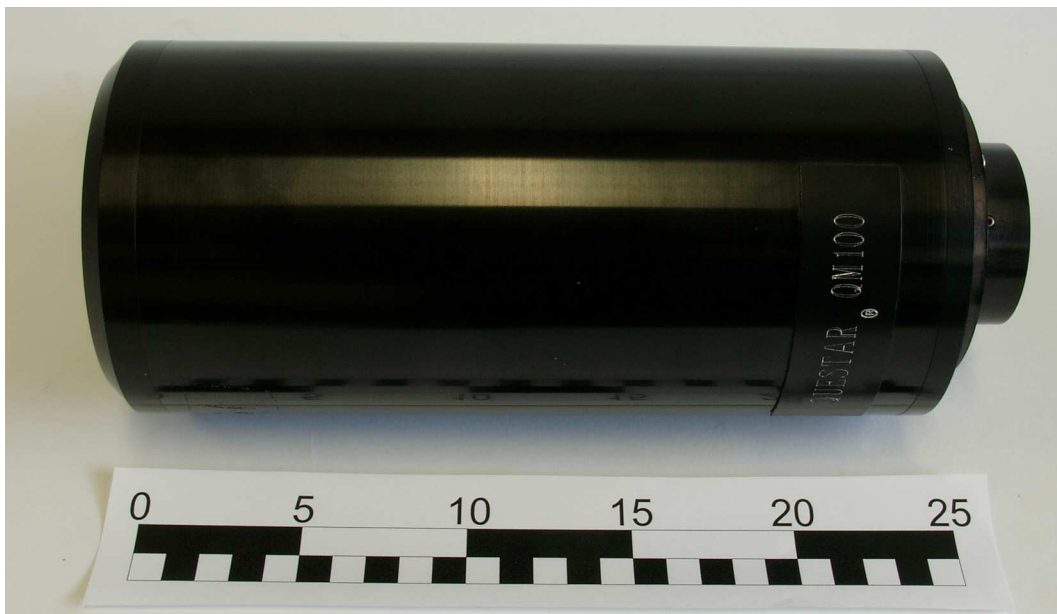


Abbildung 5.6: Langbrennweitiges Mikroskop

Blitzlampe

Für die Beleuchtung wird eine Blitzlampe verwendet, die dem Mikroskop gegenüber montiert wird und somit ein Hellfeldmikroskopie ermöglicht. Die Partikel erscheinen daher als dunkle, graue Punkte auf hellerem Hintergrund. Es kommt eine Xenon-Blitzlampe des Typs L4634 der Firma Hamamatsu inklusive der zugehörigen Einheit C3684 für Stromversorgung und Triggerung zum Einsatz. Die Blitzfrequenz dieser Lampe muß auf die Aufnahme­frequenz der CCD-Kamera (siehe nächster Abschnitt) abgestimmt werden, um jeweils eine scharfe Abbildung bei jeder Bildaufnahme zu liefern. Dazu kann die Blitzfrequenz über eine angelegte Triggerspannung auf bis zu 100 Hz geregelt und dabei sehr fein eingestellt werden. Abbildung 5.7 zeigt die verwendete Lampe samt Triggereinheit.

CCD-Kameras

Im Versuchsaufbau kamen zwei verschiedene Kameras zum Einsatz (siehe Abbildung 5.8), die an das oben beschriebene Mikroskop mittels einer CS-Mount-Verbindung³ angeschlossen werden können. Die Brennebene des Mikroskops liegt dann genau auf den CCD-Sensoren der Kameras. Die während der ADAM+EVE-Kampagne verwendete Kamera war eine CSB-305 (CCIR) der Firma Pacific Corporation. Diese Kamera hat eine Auflösung von 500×582 Pixeln, die sich auf einen CCD-Chip von 1/3 Zoll verteilen, so daß sich vertikal eine Pixelgröße von $9,4 \mu\text{m}$ ergibt, horizontal von $6,5 \mu\text{m}$ (vgl. Tabelle 5.1). Diese Auflösung erwies sich jedoch als teilweise ungeeignet. Die Bildqualität der Kamera war nicht ausreichend. Um die Bildqualität zu verbessern, wurde beim CAIN+ABEL-Experiment eine Kamera von Typ DMK 2013-PT der Firma Imaging Sour-

³CS-Mount ist eine normierte Schnittstelle zwischen professionellen Kameras und Objektiven.

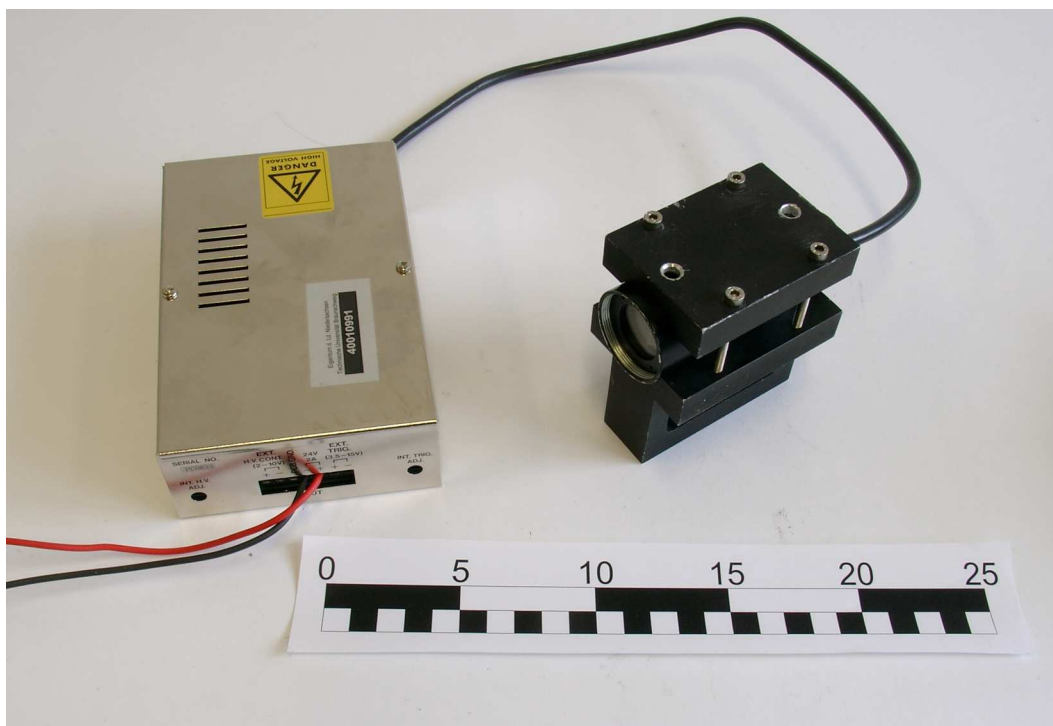


Abbildung 5.7: Blitzlampe mit Steuergerät

Kamera	CCD Größe	Auflösung	Pixelgröße
CSB-305	3/4 Zoll	752 × 582	6,5 × 9,4 μm^2
DMK 2013-PT	3/4 Zoll	752 × 582	6,5 × 6,25 μm^2

Tabelle 5.1: Parameter der verwendeten CCD-Kameras

ce verwendet. Diese Kamera hat mit einer Auflösung von 752×582 Pixeln, wiederum verteilt auf 1/3 Zoll, eine vertikale Pixelgröße von $6,25 \mu\text{m}$ und eine horizontale Pixelgröße von $6,5 \mu\text{m}$. Aufgrund der verschiedenen CCD-Chips und der zwei möglichen Vergrößerungsfaktoren des Mikroskops (siehe Kapitel 5.1.3) werden zwischen $0,69$ und $1,28 \mu\text{m}$ auf einen Pixel abgebildet. Tabelle 5.2 zeigt die möglichen Vergrößerungs- und Abbildungsverhältnisse. Beide Geräte liefern ein Composite-Videosignal mit einer Auflösung von 752 Zeilen, das von herkömmlichen Videogeräten aufgezeichnet werden kann.

Der verwendete Staub wird bei einer Größe von minimal $1 \mu\text{m}$ also grade eben vom optischen System aufgelöst, sofern die qualitativ bessere Kamera verwendet wird. Grö-

Kamera	Abbildung per Pixel		Bildausschnitt	
	μm^2	μm^2	μm^2	μm^2
Vergrößerung	6,5 fach	8 fach	6,5 fach	8 fach
CSB-305	$1 \times 0,69$	$1,23 \times 0,85$	724×582	588×473
DMK 2013-PT	$1 \times 1,04$	$1,23 \times 1,28$	724×582	588×473

Tabelle 5.2: Abbildungsverhältnisse der verwendeten CCD-Kameras

ßere Staubkörner werden von beiden Kameras aufgelöst. Die beiden Kameras liefern ein Standard-Videosignal mit jeweils 50 Halbbildern pro Sekunde. Dabei werden jeweils gerade und ungerade Zeilen geliefert, so daß in den resultierenden 25 Bildern jeweils zwei Halbbilder eingebettet sind. Die Bilder des abgespeicherten Videomaterials müssen also beim Auswerten in gerade und ungerade Bilder separiert werden. Das Bildsignal der Kameras wurde dann über das in Kapitel 5.2.2 beschriebene System verarbeitet und gespeichert.



Abbildung 5.8: CCD-Kameras: das linke Bild zeigt die während des ADAM+EVE-Experiments genutzte CCD-Kamera, die aufgrund ihrer schlechten Bildqualität im CAIN+ABEL-Experiment durch das Modell auf der rechten Seite ersetzt wurde.

5.1.4 Struktur und Montage im Flugzeug

Um das Experiment im Flugzeug befestigen zu können und die mechanische Stabilität während Start und Landung zu gewährleisten, mußte ein ausreichend stabiler Rahmen, das sogenannte Rack, gebaut werden, um alle Komponenten aufzunehmen. Teile dieses Racks wurde vom ADAM-Experiment übernommen. Der größte Teil, insbesondere der Teil, der das Spulensystem umschließt, mußte jedoch neu konstruiert werden. Dabei war auf die Stoßfestigkeit zu achten. Die Sicherheitsbestimmungen an Bord des Flugzeuges erfordern eine Stabilität des Versuchsaufbaus gegen Beschleunigungen von $9 g$ in Flugzeuglängsrichtung.

Es wurde ein separates Pumpenrack konstruiert, um die Vibrationen der Pumpe von den anderen Komponenten abzukoppeln. Alle Komponenten, deren direkte Nähe zur Vakuumkammer nicht erforderlich ist, wurden ebenfalls auf ein separates Rack ausgelagert. Dieses sogenannte Controlrack enthält die Komponenten zur Datenaufnahme - zwei Rechner und den Videorecorder als Backupsystem - sowie die zur Steuerung des Spulensystems erforderliche Elektronik, die Druckmessung, Beschleunigungs- und Temperatursensorik. All diese Komponenten sind weitere magnetische Störquellen und deshalb in einigem Ab-

stand zum Experimentierraum besser aufgehoben.

Das Rack selber wurde aus Profilen verschiedenen Querschnitts - die Kantenlängen lagen bei $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ beziehungsweise bei $80\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ - der Firma Item errichtet. Dabei mußten für die senkrecht stehenden Elemente extrem stabile Profile verwendet werden, um die Stabilität zu gewährleisten. Es wurden Profile mit extra starker Wanddicke verwendet, die eine Kantenlänge von $80\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ haben. Fünf dieser Profile bildeten das Grundgerüst des Haupttracks, das in Abbildung 5.9 zu erkennen ist. Die stabileren Seitenprofile sind in der Grafik rot eingetragen. Die verbindenden Elemente bestanden aus wesentlich leichteren Profilen, deren Widerstandsmoment bei $4,66\text{ cm}^3$ liegt; sie sind in der Abbildung violett. Mit dieser Konstruktion war es möglich, die Sicherheitsbestimmungen für den Parabelflug zu erfüllen.

Im Inneren dieser die Spulen umgebenden Konstruktion wurden aus weiteren leichten Profilen (grün dargestellt) zusätzliche Konstruktionselemente angebracht, um die Komponenten des Experimentes zu befestigen. Dabei wurden Vakuumkammer und Magnetometer in der Mitte des Spulensystems zentriert, um den maximalen Homogenitätsbereich auszunutzen (siehe auch Kapitel 4.6 und 5.3).

Die Anordnung der Komponenten im Flugzeug wurde auf die Verfügbarkeit der nötigen Anschlüsse optimiert. Das Controlrack und das Pumpenrack mußten in der Nähe der Stromanschlüsse bzw. des Ventline-Anschlusses zur Entlüftung der Pumpe positioniert werden.

5.1.5 Stromversorgung

Die elektrischen Komponenten des Experimentes werden über das Bordnetz des Parabelflugzeugs mit Strom versorgt. Dabei stehen sowohl Gleichspannung (28V) als auch Wechselspannung (230V) zur Verfügung. Die Anschlüsse sind an der Flugzeugwand in 10 Gruppen angeordnet, den sogenannten Panels. Jedes der Panels unterstützt Anschlußleistungen bis 8 A (220 V) bzw. 20 A (28 V). Aus technischen Gründen ist es praktischer, die 230V-Wechselspannungsversorgung zu nutzen, da Gleichstrom eine Umrüstung der Komponenten erfordern würde. Weiterhin würde eine Versorgung mit Gleichstrom bei einer Spannung von 28V wegen der hohen benötigten Stromstärken weitere magnetische Störfelder erzeugen, die wiederum vom Spulensystem (siehe Kapitel 5.3) kompensiert werden müßten. Der Anschluß an das Bordnetz erfolgt über Schutzkontaktstecker, jedoch muß das Experiment speziell gesichert werden: Eine flinke Sicherung, die den Stromfluß auf einen Wert knapp über den Nennleistungen der Geräte begrenzt sowie ein Notausschalter schützen das Experiment und das Flugzeug im Notfall. Die Gesamtleistung der elektrischen Komponenten lag beim ADAM+EVE-Experimentaufbau unter 6 A bei 220 V, beim CAIN+ABEL-Aufbau unter 8 A.

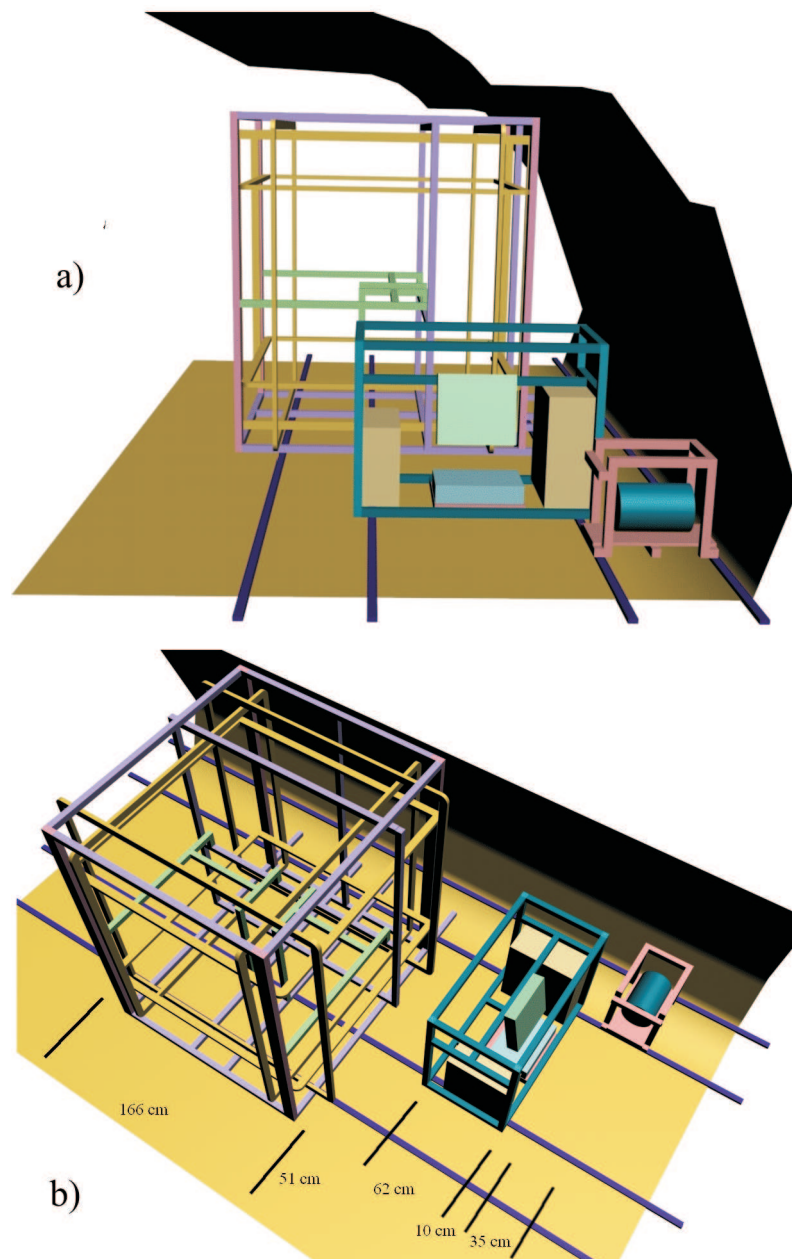


Abbildung 5.9: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten des ADAM+EVE-Aufbaus. Abbildung a) zeigt die Seitenansicht mit Profil der Flugzeugwand, Abbildung b) die Ansicht von schräg oben. Man erkennt das Haupttrack mit dem Spulensystem (grün, gelb und violett), das Controlrack (dunkelgrün) mit Computern (gelb), Monitor (grün) und VCR (Türkis) und das Pumpenrack. Am Boden sind die eingelassenen Befestigungsschienen zu erkennen, an denen ursprünglich die Sitze des Flugzeuges befestigt waren und nun das Experiment zu befestigen ist. Dabei ist aus Sicherheitsgründen auf einen Abstand von mindestens 50 cm zwischen den einzelnen Racks zu achten.

5.2 Versuchsaufbau: Datenaufnahme und Weiterverarbeitung

5.2.1 Meßgeräte und Datenaufnahme

Beschleunigungssensoren

Um die Qualität der erzeugten Mikrogravitation zu ermitteln und dabei nicht auf Daten des Parabelflugzeugs angewiesen zu sein, da diese manchmal nicht korrekt oder gar nicht aufgezeichnet werden, ist ein dreiachsiger Beschleunigungssensor in den Versuchsaufbau fest integriert. Weiterhin lassen sich aus den gespeicherten Beschleunigungsdaten leicht die Zeitpunkte in den Dateien ermitteln, an denen die einzelnen Parabeln starteten.

Die Achsen des Sensors liegen parallel zur Flugzeugachse in Flugrichtung und zu den Flügeln sowie senkrecht zum Flugzeugboden. Das Gerät ist aus zwei Zweiachsbeschleunigungssensoren ADXL202 der Firma Analog Devices konstruiert. Die Funktionsweise der Sensoren basiert auf mikromechanischen Hebeln, deren Auslenkung in die jeweilige Richtung aufgrund der Beschleunigungskräfte kapazitiv erfaßt wird. Die Sensoren arbeiten in ihrem Meßbereich von $-2 g$ bis $+2 g$ mit einer Genauigkeit von etwa $0,02 g$. Die Kalibrierung der Beschleunigungssensoren wurde im Vorfeld der Kampagnen vorgenommen, da der Flugzeugboden während der Integrationsphase nicht waagrecht ist. Eine Kalibrierung auf schrägem Untergrund hätte zu Mißweisungen der Achsen geführt. Der dreiachsige Sensor ist in Abbildung 5.10 zu erkennen.

Temperatursensor

Der Temperatursensor vom Typ LM35 des Herstellers National Semiconductors ist für die Eichung der anderen Meßgeräte notwendig, da sowohl Magnetometer als auch Beschleunigungssensoren temperaturabhängige Daten liefern. Es handelt sich bei ihm um einen integrierten Schaltkreis, dessen Meßelement eine temperaturempfindliche Diode ist. Der Sensor hat einen Meßbereich von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einer Signalstärke von $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Da die Kabinentemperatur während des Parabelfluges in der Regel konstant bei etwa $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ gehalten wird, sind Verfälschungen der Meßwerte von Magnetometer und Beschleunigungssensor durch Schwankungen der Temperatur allerdings nicht zu erwarten.

Messung des Kammerdruckes

Während der kompletten Versuchsdurchführung wurde der Druck in der Vakuumkammer verfolgt. Dabei kam das Druckmeßgerät PIZA 111 der Firma Ilmvac zum Einsatz. Das Gerät ist ein Piranimeßgerät, welches den Druck aufgrund der Wärmeleitfähigkeit des zu messenden Mediums bestimmt. Der Meßbereich des Gerätes geht von ca. 1050 hPa bis $1 \cdot 10^{-3}\text{ hPa}$ und deckt damit den notwendigen Bereich vollständig ab. Die Anzeige des Druckes ist auf vier Stellen genau, so daß die Ablesegenauigkeit bei Normaldruck

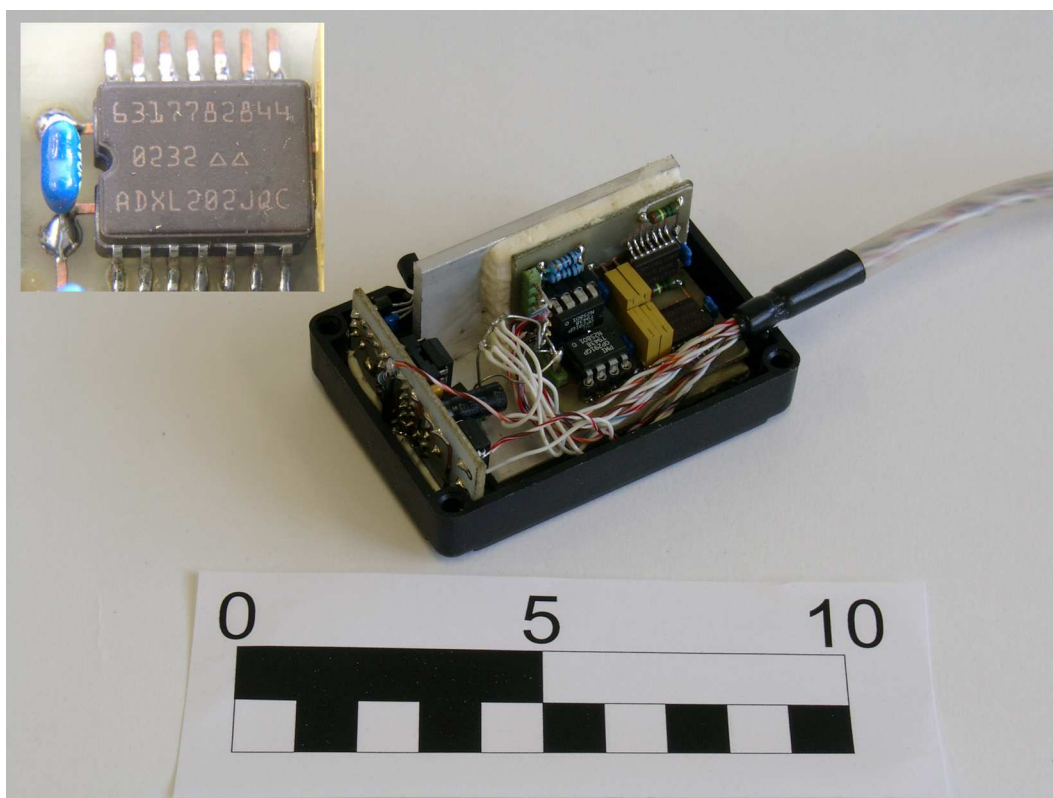


Abbildung 5.10: Der verwendete Beschleunigungssensor: Das untere Bild zeigt den kompletten Sensor, der sich aus zwei zweiachsigen, elektronischen Beschleunigungssensoren zusammensetzt; einer davon ist im oberen Bildausschnitt zu erkennen.

1 hPa, bei $1 \cdot 10^{-3}$ 0,001 hPa beträgt. Aufgrund der begrenzten Datenkanäle der D/A-Wandlertarte, die zur Datenaufnahme verwendet wurde, und der fehlenden Schnittstelle des Gerätes konnte der Druck nur manuell registriert werden. Dabei wurde jeweils der auf dem mitgelieferten Anzeigegerät erscheinende Kammerdruck nach dem Einschub des Staubes notiert. Abbildung 5.11 zeigt das verwendete Gerät.

Magnetometer

Im Versuchsaufbau wurden zwei unterschiedliche Magnetometer verwendet. Eines von ihnen ist zur Steuerung des Kompensationsspulensystems (siehe Kapitel 5.3) notwendig und wurde bereits auf der ADAM+EVE-Kampagne mitgeführt. Das zweite Magnetometer, das zur CAIN+ABEL-Kampagne integriert wurde, dient der unabhängigen Messung des Magnetfeldes im Versuchsraum während der Flüge, da es früher teilweise Probleme mit dem Auslesen und Abspeichern der Daten des Steuermagnetometers gegeben hatte.

Das Steuerungsmagnetometer setzt sich aus mehreren magnetoresistiven Magnetfeldsensoren des Typs HMC1021/1022 der Firma Honeywell zusammen. Drei solcher Sensoren sind jeweils senkrecht zueinander angeordnet. Der so konstruierte dreiachsige Sensor weist einen Meßbereich von ± 60.000 nT bei einer Auflösung von 8 nT auf. Diese Werte



Abbildung 5.11: Der verwendete Pirani-Drucksensor inklusive des angeschlossenen Anzeigergerätes.

sind ausreichend, um das in Kapitel 5.3 beschriebene Spulensystem anzusteuern. Messungen im Flugzeug (siehe Kapitel 4.5) haben Maximal- bzw. Minimalwerte der einzelnen Komponenten des Feldes in Flugzeug innerhalb dieses Meßbereichs gezeigt.

Das Referenzmagnetometer des CAIN+ABEL-Experimentes ist ein dreiaxsiges Fluxgate-Magnetometer. Das Meßprinzip des Gerätes basiert auf einer mittels eines sinusförmigen Erregerfeldes in magnetische Sättigung getriebene Spule mit einem Kern. Aus den Antwortsignalen kann über die zweite Harmonische das anliegende externe Feld ermittelt werden. Dieser Typ von Magnetometer ermöglicht sehr schnelle und hochaufgelöste Magnetfeldmessungen. Das Gerät wurde von Grund auf am IGeP entwickelt und gebaut und im Vorfeld der Aggregationsexperimente für verschiedenste Meßkampagnen verwendet. Der Meßbereich des Gerätes liegt bei ± 100.000 nT je Komponente bei einer Genauigkeit im einstelligen Nanoteslabereich. Es handelt sich bei beiden Magnetometern um absolut messende Geräte, die das Magnetfeld separiert in drei Raumrichtungen messen können und am IGeP kalibriert wurden.

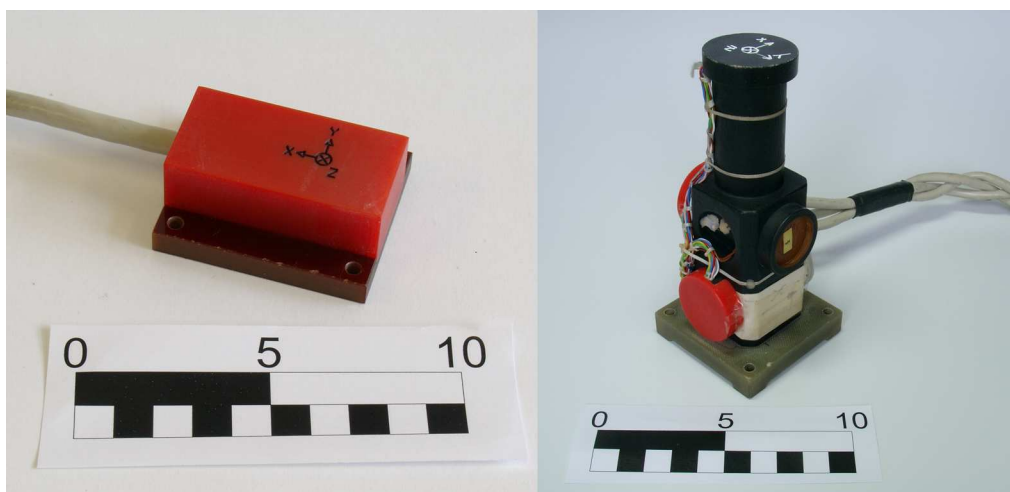


Abbildung 5.12: Magnetometer: a) Steuerungsmagnetometer für das Spulensystem, b) Referenzmagnetometer, um Präzision und Reaktionsschnelligkeit des Steuerungsmagnetometers, der Spulenelektronik und des Spulensystems zu überprüfen.

Datenaufzeichnung

Die Meßdaten der oben im Kapitel erläuterten Geräte werden zusammengeführt und mittels einer Analog-Digital-Wandlerkarte digitalisiert. Ein Programm verarbeitet sie zunächst und speichert sie dann ab. Die A/D-Wandlerkarte, die bei der ADAM+EVE-Kampagne verwendet wurde, stellt insgesamt acht beziehungsweise 16 Kanäle im *Single-Ended-Modus* zur Verfügung. Der *Single-Ended-Modus* verwendet im Gegensatz zum *Differential-Modus* jeweils zwei Kanäle zur Messung eines Wertes und nutzt daher die gemeinsame Erdung aller Kanäle. An diesen Kanälen liegen die Komponenten des Beschleunigungssensors (a_x, a_y, a_z) und des Steuermagnetometers (B_x, B_y, B_z) sowie das Signal des Temperatursensors an. Weiterhin registriert die Karte das Einschußsignal, das die Steuerung der Staubkanone abgibt. Beim Aufbau des CAIN+ABEL-Experimentes wurde die Karte im *Single-Ended-Modus* betrieben, was zu größerem Rauschen in den Daten führt, weil Störsignale anderer Komponenten des Meßcomputers auf der Erdungsleitung liegen und die Messungen beeinflussen. Dafür stehen jedoch zusätzliche Kanäle für die Aufnahme der Daten des Referenzmagnetometers zur Verfügung. Die Karte des Herstellers Data Translation vom Typ DT-23 EZ erlaubt in Verbindung mit dem angeschlossenen Rechner eine Rate von 18 Meßwerten pro Sekunde aufzuzeichnen.

Aus Sicherheitsgründen wird die Datenaufzeichnung alle 300 Sekunden unterbrochen und eine neue Datei erstellt. Während der Datenaufzeichnung wird die Speicherdatei vom Programm zum Schreiben offengehalten. Das führt dazu, daß im Falle eines Stromausfalls die bisher aufgezeichneten Daten verloren gehen, da die Datei nicht geschlossen wird. Durch das Schließen der aktuellen Datei nach jeweils fünf Minuten werden die Daten dieses Zeitraumes jedoch gesichert, dabei verliert das Programm aus Zeitgründen jedoch ein Datensample, so daß die Datenaufzeichnung für 1/18 Sekunde unterbrochen wird. Nach dem Flug werden diese einzelnen Dateien mittels eines kleinen Programms zusammengefügt, um jeweils den kompletten Datensatz eines Fluges zur Verfügung zu haben.

5.2.2 Videoaufnahme und Weiterverarbeitung

Das von der Kamera (siehe Kapitel 5.8) gelieferte Composite-Videosignal wird zunächst an einen SVHS-Videorecorder (Typ NV-HS850 von Panasonic) zur Aufnahme weitergeleitet. Die Verwendung von SVHS hat sich hier als praktisch erwiesen, da bei dieser Videoaufzeichnungsmethode das Farb- und das Helligkeitssignal getrennt kodiert werden, somit werden die Graustufensignale der CCD-Kameras (siehe Kapitel 5.1.3) nicht durch Farbsignale verfälscht. Von dort aus wird das Signal direkt im Computer mit einer Videokarte (Typ WinTv PVR 350 von Hauppauge) digitalisiert und als komprimierter MPEG-Strom auf eine Festplatte geschrieben. Die MPEG-Komprimierung beeinflusst die Qualität der Aufnahmen kaum (Rost 2001). Die parallele Speicherung auf dem Videorecorder hat den Sinn, im Falle von Datenverlusten auf dem Computer eine redundante Sicherungskopie zur Verfügung zu haben.

5.3 Technische Umsetzung der Magnetfeldmanipulation

Die bisher beschriebenen Komponenten stellen die Hauptbestandteile eines Aufbaus für magnetische Aggregationsexperimente dar. Wie in Kapitel 4 beschrieben, existieren jedoch an Bord des Parabelflugzeugs störende Magnetfelder, die den Aggregationsprozeß der magnetischen Partikel beeinflussen. Um diesen Einfluß zunächst auszuschließen, aber auch um später den Einfluß von externen Feldern auf den Aggregationsprozeß beurteilen zu können, wurde ein System entwickelt, das das Magnetfeld im Experimentierraum beeinflussen kann.

5.3.1 Das Spulensystem

Als Gerät zur Kompensation beziehungsweise Erzeugung von magnetischen Feldern kam ein dreiachsiges Rechteckspulensystem zum Einsatz. In Kapitel 4.6 wurden bereits die Wirkungsweise und Eigenschaften von Spulensystemen diskutiert. Für die technische Umsetzung der Magnetfeldmanipulation muß ein System eingesetzt werden, das den Versuchsraum, also das Innere der Vakuumkammer, mit seinem Homogenitätsbereich einschließt. Dafür ist es wichtig, einen auf die Größe der Vakuumkammer angepaßten Homogenitätsbereich zu haben. Dieser hängt im wesentlichen von der Seitenlänge der Spulen ab.

Die Spulenpaare des verwendeten Systems haben eine Kantenlänge von 1,58 m, 1,68 m und 1,78 m. Dabei ist das kleinste Spulenpaar horizontal angeordnet, kompensiert also das Feld beziehungsweise erzeugt ein Magnetfeld in z-Richtung und liegt innerhalb der z- und der y-Spulen. Diese wiederum liegen je nach Positionierung in x- beziehungsweise y-Richtung des Flugzeuges (zur Ausrichtung der Koordinatensysteme im Flugzeug siehe Kapitel 5.4.2 und 5.5.2). Die Spulen haben jeweils 60 Windungen aus Kupferdraht mit einem Querschnitt von $5,3 \text{ mm}^2$, die um einen stabilen Aluminiumrahmen gewickelt sind.

Die Wicklung ist mit Silikon vergossen, um Beschädigungen des Drahtes zu verhindern. Die einzelnen Spulen werden durch feste Verschraubungen aneinander und am Rack gehalten. Dabei haben die Spulen untereinander einen Abstand von 109 cm (z-Spulen), 119 cm (y-Spulen) beziehungsweise 124 cm (x-Spulen). Abbildung 5.13 zeigt sowohl eine schematische Abbildung, als auch ein Foto des Spulensystems.

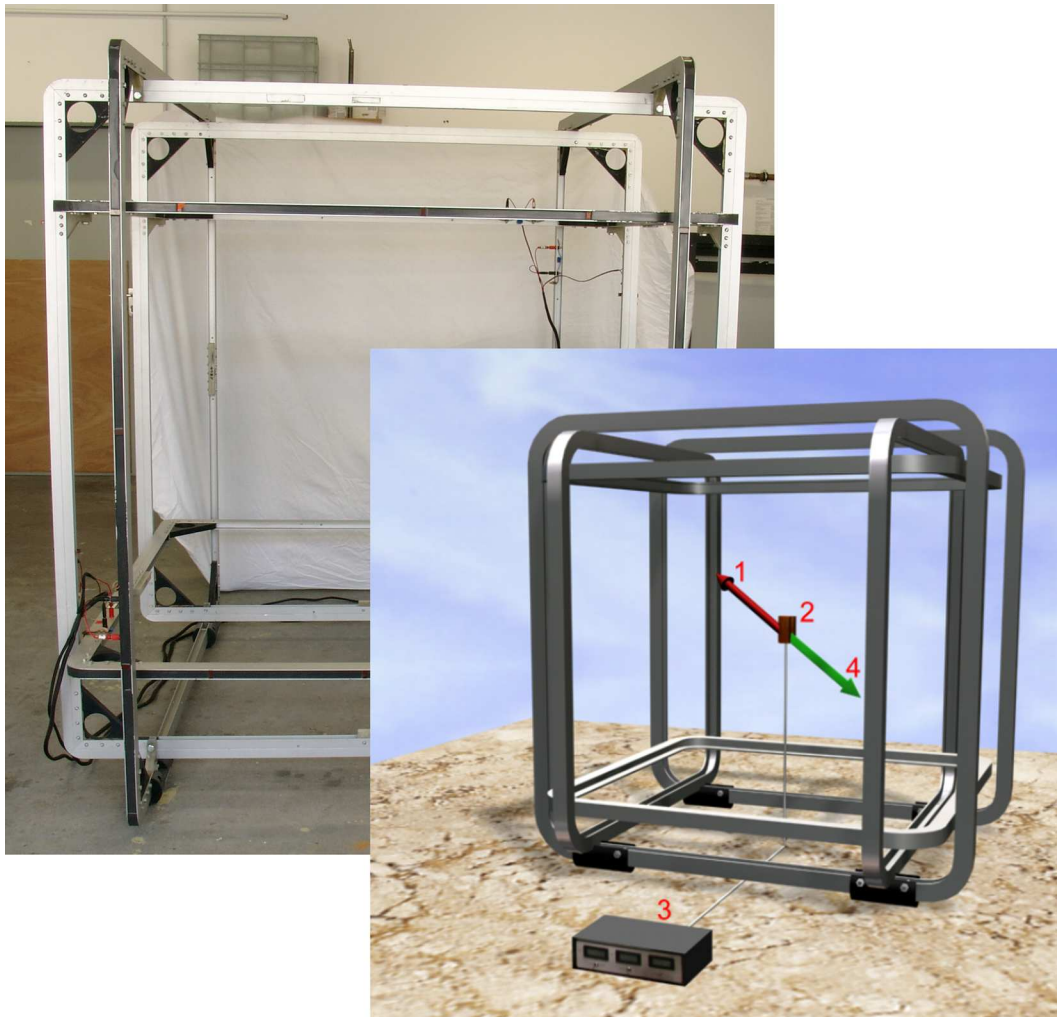


Abbildung 5.13: Das in der Abbildung gezeigte dreiachsige Rechteckspulensystem wurde sowohl für das ADAM+EVE- als auch für das CAIN+ABEL-Experiment eingesetzt. Das obere linke Bild zeigt ein Foto der Spulen, während im unteren Bild eine schematische Darstellung zu erkennen ist. Der rote Pfeil (1) repräsentiert hier das externe magnetische Feld, das vom Magnetometer (2) erfaßt wird. Die Meßwerte des Magnetometers werden von der Elektronik (3) verarbeitet, entsprechende Ströme werden durch die Spulen geleitet, um ein Gegenfeld (4) zu erzeugen.

5.3.2 Steuerung des Spulensystems

Die Steuerung des Spulensystems übernimmt eine Elektronik, die die Daten des in Kapitel 5.2.1 näher beschriebenen Steuermagnetometers auswertet. Der Strom, der die einzelnen Spulenpaare durchfließt, wird dann von der Elektronik derart geregelt, daß am Ort des Steuermagnetometers das resultierende Feld aus Erdfeld, Störfeldern und dem vom Spulensystem erzeugten Feld gegen Null geht.

Hierbei ist zu beachten, daß aus Platzgründen die Anordnung des Steuermagnetometers innerhalb der Kammer nicht möglich ist. Eine Integration des Magnetometers in die Kammer würde sowohl die Beobachtung der Vorgänge darin behindern, als auch den Austausch der Probensammelkapsel während der Versuchsdurchführung unmöglich machen, da die Kapsel beim Tausch das volle Kammervolumen benötigt. Deshalb ist das Steuermagnetometer außerhalb der Vakuumkammer montiert. Dabei wurde jedoch darauf geachtet, daß es möglichst nah am Versuchsraum befestigt wurde. Eine Positionierung des Magnetometers direkt an der Kammerwand verringert den Abstand zum Zentrum der Vakuumkammer auf 7 cm.

Da während der CAIN+ABEL-Kampagne Aggregationsexperimente nicht nur unter kompensierten Magnetfeldbedingungen, sondern auch unter verschiedenen, fest eingestellten Magnetfeldern durchgeführt werden sollten, wurde die Elektronik hierfür gegenüber der ADAM+EVE-Kampagne modifiziert. Das überarbeitete Elektroniksystem kann für jede der drei Raumachsen getrennt auf ca. 100.000 nT eingestellt werden, so daß theoretisch ein Maximalfeld von etwa 140.000 nT angelegt werden konnte. Dieser Wert wurde jedoch durch die Meßbereiche der verwendeten Magnetometer (siehe Kapitel 5.2.1) auf ein Gesamtfeld von ca. 100.000 nT beschränkt.

5.3.3 Magnetfeldverlauf im Spulensystem

Der Feldverlauf innerhalb des Spulensystems läßt sich zwar anhand der durchgeführten Vorbetrachtungen in Kapitel 4.6 abschätzen, doch scheint eine genauere Untersuchung zur Charakterisierung des Feldverlaufes notwendig. In den in Kapitel 4.6 berechneten Spulenkonfigurationen stecken folgende Annahmen, die mit dem verwendeten System nicht übereinstimmen:

Es handelt es sich nicht um ein Helmholtzspulensystem, sondern um Rechteckspulen. Diese sind paarweise in drei Raumrichtungen angeordnet. Eine weitere Beeinflussung des Magnetfeldes im Inneren des Spulensystems bewirken die darin montierten Versuchsaufbauten, die Vakuumkammer, die Beobachtungsgeräte und die Profile des Racks. Obwohl darauf geachtet wurde, möglichst keine remanent magnetisierbaren Komponenten zu verwenden, wirken sich die para- und diamagnetischen Eigenschaften dieser Komponenten auf die Qualität der Kompensation aus.

Um einen Eindruck vom realen Feldverlauf innerhalb und in der Umgebung des Spulensystems zu bekommen, wurde im Vorfeld eine Vermessung des Spulensystems in drei Raumrichtungen durchgeführt. Abbildung 5.14 zeigt den gemessenen Feldverlauf.

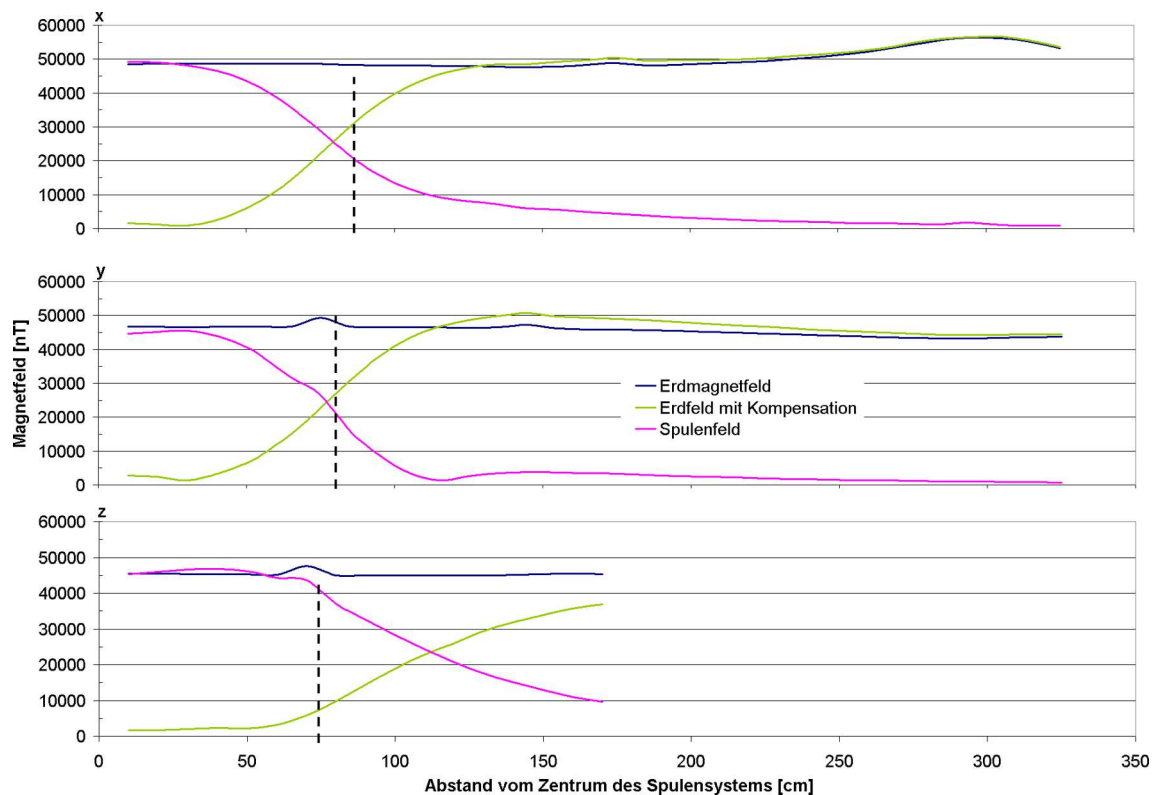


Abbildung 5.14: Verlauf des Magnetfeldes im Spulensystem. Gemessen wurde jeweils vom Zentrum des Spulensystems in drei Raumrichtungen. Das Zentrum liegt im Ursprung der drei Graphen. Aufgetragen sind für jede Raumrichtung die Beträge des Feldes bei eingeschalteten Spulen, bei ausgeschalteten Spulen und die Differenz dieser Beträge.

Die Graphen veranschaulichen, daß das Magnetfeld nahe des Zentrums des Spulensystems auf unter 5% des Erdfeldes abfällt, wenn die Kompensation aktiviert ist. Eine Messung genau im Zentrum ist nicht möglich, da an dieser Stelle das Steuermagnetometer platziert ist. Vom Zentrum nach außen hin steigt das Feld stetig an, um sich dann ca. zwei Meter außerhalb der Spulen asymptotisch dem lokalen Erdfeld anzunähern. Es ist zu beachten, daß das lokale Erdmagnetfeld durch die Geometrie und das Material des Raumes, in dem das Spulensystem während der Messung installiert war, und durch paramagnetische Komponenten des Spulensystems selber beeinflusst wird. So ist etwa 15 cm vor der Spulenposition im Inneren des Systems ein Anstieg des lokalen Feldes in y- und z-Richtung von ca. 2.000-3.000 nT zu erkennen, der eindeutig auf den Einfluß des Spulenkörpers zurückzuführen ist. Eine Messung in z-Richtung war aufgrund der Raumhöhe nur bis zu einem Abstand vom Spulenmittelpunkt von 170 cm möglich. Die Messungen wurden insbesondere für die Sicherheitsüberprüfung des Spulensystems für den Flug (siehe Kapitel 3.2) durchgeführt, um den Einfluß von ihm emittierter Felder auf die Flugzeugelektrik abzuschätzen.

5.4 Aufbau und Durchführung des ADAM+EVE-Experimentes im Flugzeug

5.4.1 Versuchsaufbau im Flugzeug

Das ADAM+EVE-Experiment wurde von der ESA für die Teilnahme an der 36. Parabelflugkampagne ausgewählt. Der Versuchsaufbau bestand zu Teilen aus den erprobten Komponenten des ADAM-Experimentes (Kapitel 4.1). Die wesentlichen Änderungen waren die Integration des Kompensationsspulensystems (siehe Kapitel 5.3) und die Messung des Magnetfeldes im Versuchsraum. Im Gegensatz zum ADAM-Experiment bestand das ADAM+EVE-Experiment aus einem großen Hauptrack und einem daneben stehenden Controlrack, das die Aufnahmegeräte, Computer und Elektronik beherbergte. Die benötigte Vakuumpumpe war wie beim ADAM-Experiment auf ein externes Rack ausgegliedert worden, um die anderen Komponenten des Experimentes vor den Vibrationen der Pumpe zu schützen.

Da das ADAM+EVE-Experiment eine wesentlich größere räumliche Ausdehnung hatte als das Vorläuferexperiment ADAM, war bereits die sicherheitstechnische Vorbereitung des Experimentes um einiges schwieriger. Das in Kapitel 5.3 beschriebene Dreiachsspulensystem mit seiner Kantenlänge von knapp zwei Metern war allein nicht stabil genug, um den Sicherheitsanforderungen für Parabelflüge zu genügen. Deshalb mußte es mit einer stabilisierenden Profilkonstruktion umgeben werden (siehe dazu Kapitel 5.1.4). Weil diese Konstruktion erhebliche Ausmaße (ca. 180 cm × 180 cm × 170 cm) hat und nicht durch die Flugzeugtür (193 cm × 107 cm) paßt, mußte das komplette Experiment im Flugzeug aufgebaut werden. Deshalb war es im Gegensatz zu früheren Kampagnen nötig, einen Tag früher anzureisen, um die anderen Experimente beim Einbau ins Flugzeug nicht zu behindern.

Zusätzlich zur Verschraubung an den Bodenschienen des Flugzeuges mußte das Hauptrack mit Abspannungen und Befestigungen an der Handreling, die im Experimentierraum des Flugzeuges etwa in Kopfhöhe an den Seiten montiert ist, gegen Schwingungen geschützt werden. Pumpen- und Controlrack wurden normal verschraubt. Abbildung 5.15 zeigt das Hauptrack eingebaut im Flugzeug.

5.4.2 Koordinatensysteme

Aufgrund der geometrischen Anordnungsweise der einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus sind die Gerätekoordinaten sowohl zum Bezugssystem des Flugzeuges, als auch untereinander vertauscht. So zeigte zum Beispiel die z-Komponente des Steuermagnetometers in Richtung -y des Flugzeugkoordinatensystems. Bei jeder Verwendung der lokalen Koordinaten eines Meßgerätes bzw. des Spulensystems müssen daher die entsprechenden Richtungen der anderen Meßgeräte beachtet werden. Tabelle 5.3 und Abbildung 5.16 verdeutlichen die Anordnung der Bezugssysteme der Komponenten.

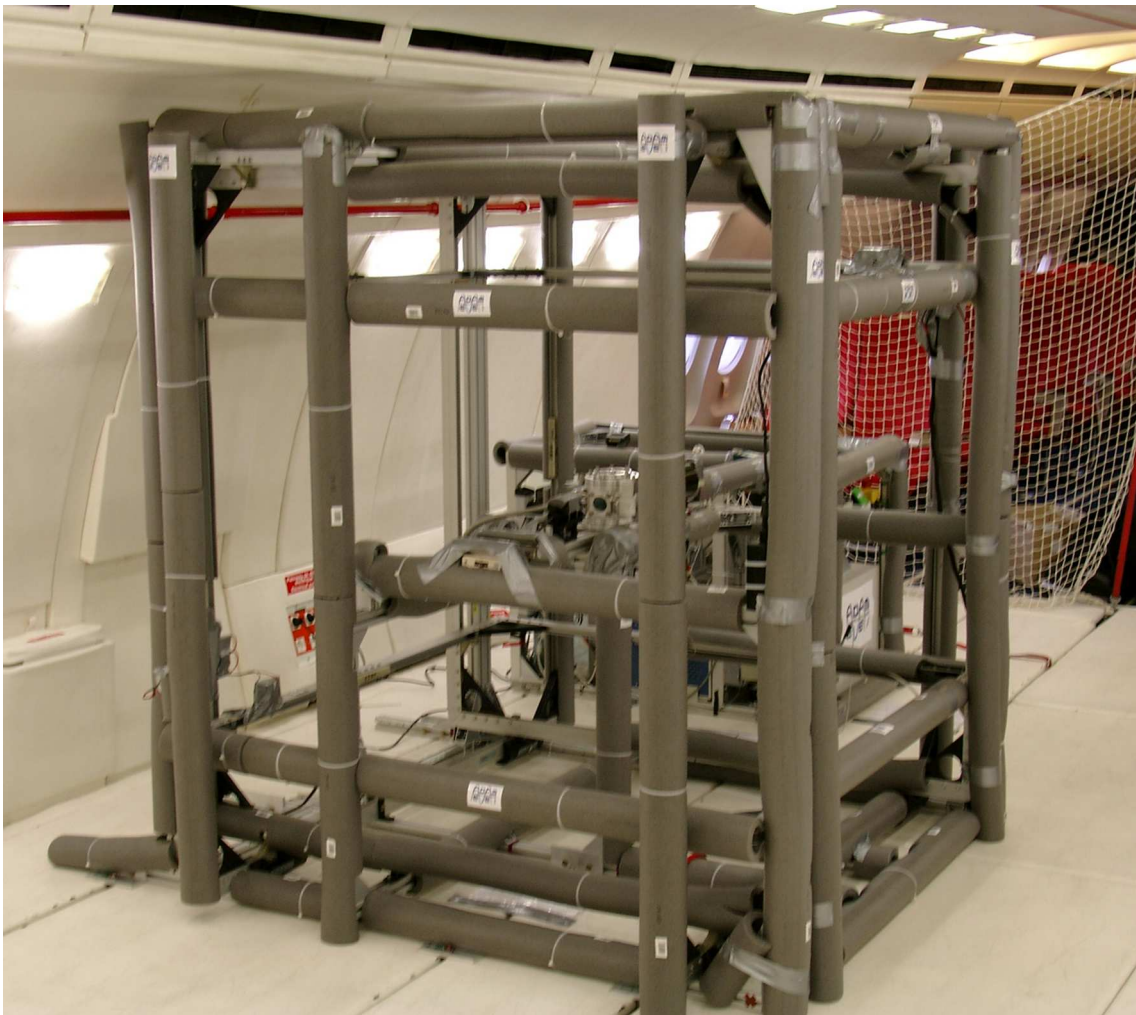


Abbildung 5.15: Haupttrack des ADAM+EVE-Aufbaus im Flugzeug. Im Vordergrund erkennt man die aufgrund der Verletzungsgefahr abgepolsterte Struktur des das Spulensystem umschließenden Haupttracks. Hinter dem Haupttrack befinden sich das Controlrack und das Pumpenrack. Der Zugang zur Vakuumkammer erfolgte durch den Experimentator 1 vom Mittelgang des Flugzeuges aus. Der zweite Experimentator saß neben dem Controlrack und bediente Pumpe und Druckmessung, während der dritte Experimentator für die Bedienung der Computer und das Führen eines Protokolls eingesetzt war.

5.4.3 Flugrouten

Wie bei den meisten Parabelflugkampagnen starteten die Flüge in Bordeaux in Frankreich. Wie bereits in Kapitel 4.5.1 erwähnt, richteten sich die Flugrouten nach den Wetterbedingungen. Bei der ESA-PFC 36 im März 2004 waren die Wetterbedingungen am ersten Flugtag so schlecht, daß der Flug nicht über dem Golf von Biskaya durchgeführt werden konnte. Stattdessen wurde die französische Küste des Mittelmeers als Fluggebiet

Komponente			
Flugzeug	x	y	z
Beschleunigungssensor	x	y	-z
Spulensystem	y	x	z
Steermagnetometer	x	-z	-y
Beschleunigungssensor (Novespace)	x	y	z

Tabelle 5.3: Anordnung der Achsen der Komponenten des ADAM+EVE-Experimentes im Flugzeug. Dargestellt sind jeweils die Gerätekoordinaten im Bezugssystem des Flugzeuges.

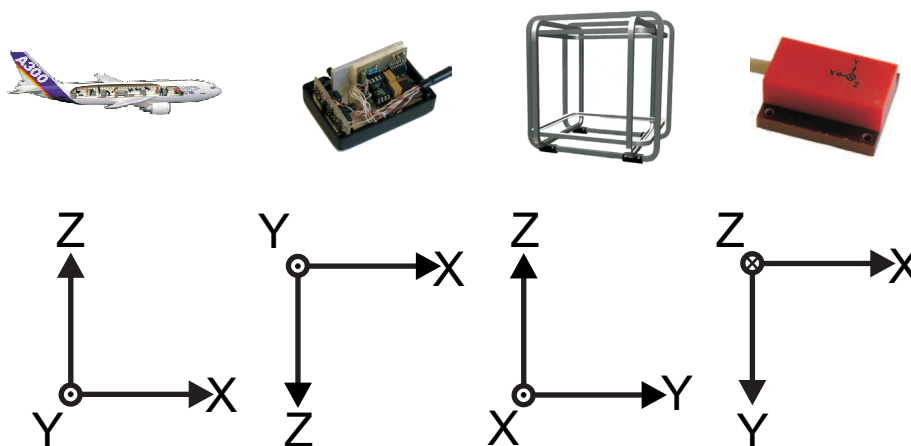


Abbildung 5.16: Koordinatensysteme der Komponenten des ADAM+EVE-Aufbaus in Relation zu den Flugzeugkoordinaten. Von links nach rechts: Flugzeugkoordinaten, Beschleunigungssensor, Spulensystem und Steermagnetometer.

ausgewählt. In Abbildung 5.17 a ist diese ungewöhnliche Route zu erkennen. Da auch das Wetter über dem Mittelmeer ungewöhnlich viele und heftige Turbulenzen aufwies, waren die Versuchsbedingungen auf diesem Flug ungünstig.

Der zweite Flug der ESA PFC 36 verlief ebenfalls nicht ohne Zwischenfälle. Der Flug mußte nach mehreren Stromausfällen aufgrund des Defektes eines Generators nach der 17. Parabel unterbrochen werden. Nach dem Austausch des Generators konnten die Experimente nach erneutem Start fortgesetzt werden. Trajektorien dieser beiden Flüge finden sich in Abbildung 5.17 b und c.

Nur der letzte Flug der ESA-PFC 36 verlief wie geplant ohne weitere Zwischenfälle. Die Flugroute dieses Fluges ist in Abbildung 5.17 d dargestellt.

5.4.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung lieferte während der ADAM+EVE-Kampagne keine optimalen Ergebnisse: Die Unterbrechung der Stromversorgung durch den Ausfall eines Generators an Bord des Flugzeugs führt zu einem Datenverlust, so daß Beschleunigungs- und

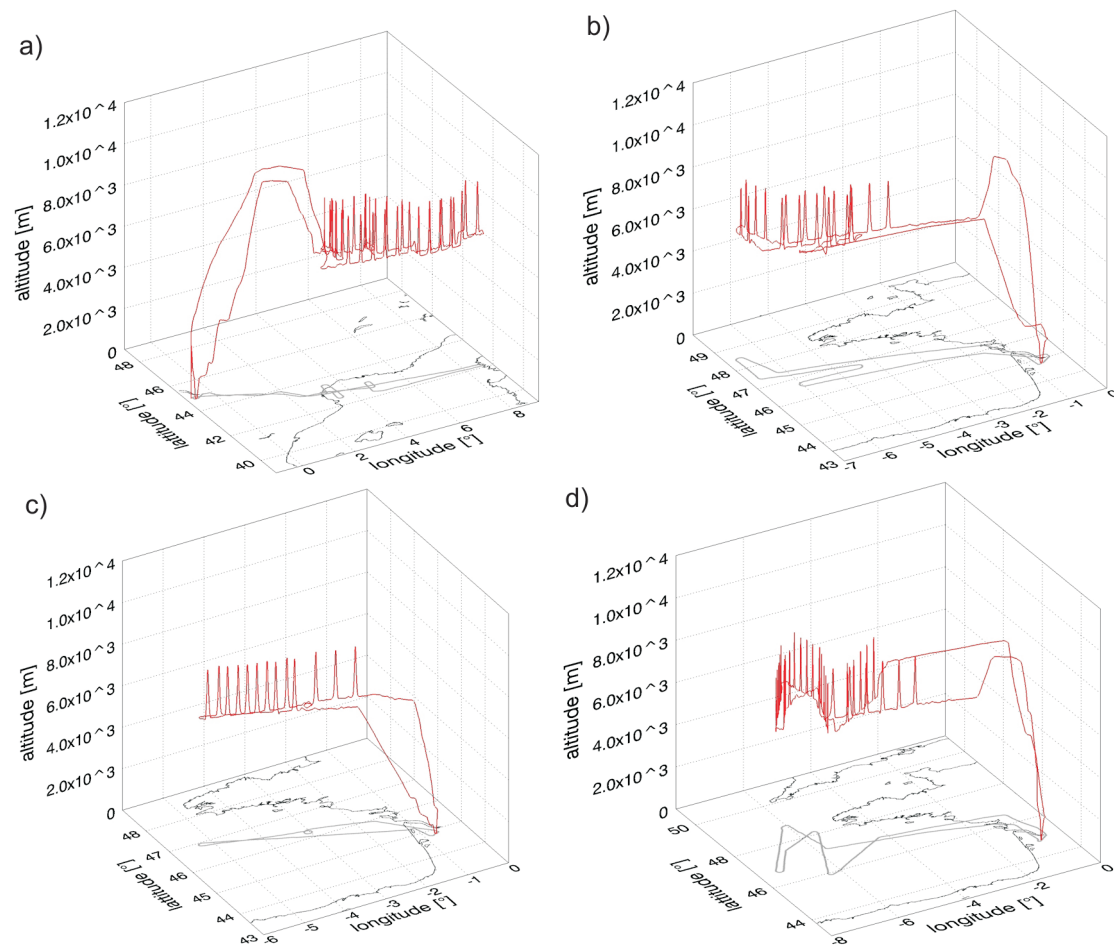


Abbildung 5.17: Flugrouten der Flüge der ADAM+EVE-Kampagne am 23.-25.3.2004. Der erste Flug (a) führte über das Mittelmeer. Der zweite Flug (b) wurde vom Ausfall eines Generators unterbrochen. Es wurden zunächst nur 17 Parabeln geflogen und nach der Unterbrechung noch einmal 13 (c). Der dritte Flug (d) verlief planmäßig.

Magnetometerdaten für den größten Teil des ersten Fluges am 24.3.2005 nicht aufgezeichnet werden konnten. Dennoch wurde der größte Teil der Einschüsse absolviert und der Auffang von Aggregaten auf den Probenträgern konnte aufgrund ihrer Unabhängigkeit von der Stromversorgung abgeschlossen werden.

Während des ersten Fluges wurde generell die Kompensation der störenden Magnetfelder durchgeführt. Zum Vergleich wurde im Laufe des zweiten Fluges nach der Hälfte der Parabeln und während der ersten Hälfte der Parabeln des dritten Fluges die Kompensation deaktiviert. Im dritten Flug wurde nicht nur reines Bariumferrit, sondern auch Mischungen mit Silikat im Verhältnis 3:1 eingeschossen. Tabelle 6.1.2 listet die verschiedenen Einschüsse auf.

Die physischen Belastungen während der Flüge führten im ersten Flug zum Ausfall von zwei Experimentatoren, was die Durchführung des Experimentes negativ beeinflusste. Die weiteren Flüge verliefen jedoch ohne Beeinträchtigungen der Experimentatoren.

5.5 Aufbau und Durchführung des CAIN+ABEL-Experimentes im Flugzeug

5.5.1 Versuchsaufbau im Flugzeug

Der Aufbau des CAIN+ABEL-Experimentes im Flugzeug war im wesentlichen der selbe, wie der, der bei dem ADAM+EVE-Experiment verwendet wurde. Neben der Elektronik, die beim ADAM+EVE-Experiment für die Kompensation des Magnetfeldes zuständig war, wurden lediglich einige Komponenten ausgetauscht und es wurde ein zusätzliches Referenzmagnetometer integriert (siehe auch Kapitel 5.2.1).

5.5.2 Koordinatensysteme

Die Anordnung der Bezugssysteme der einzelnen Meßkomponenten bzw. des Spulensystems war auch beim CAIN+ABEL-Experiment nicht identisch. Tabelle 5.4 und Abbildung 5.18 verdeutlichen die Anordnung.

Komponente			
Flugzeug	x	y	z
Beschleunigungssensor	x	y	-z
Spulensystem	y	x	z
Steermagnetometer	-x	-z	y
Referenzmagnetometer	x	y	-z
Beschleunigungssensor (Novespace)	x	y	z

Tabelle 5.4: Anordnung der Achsen der Komponenten des CAIN+ABEL-Experimentes im Flugzeug. Dargestellt sind jeweils die Gerätekoordinaten im Bezugssystem des Flugzeuges.

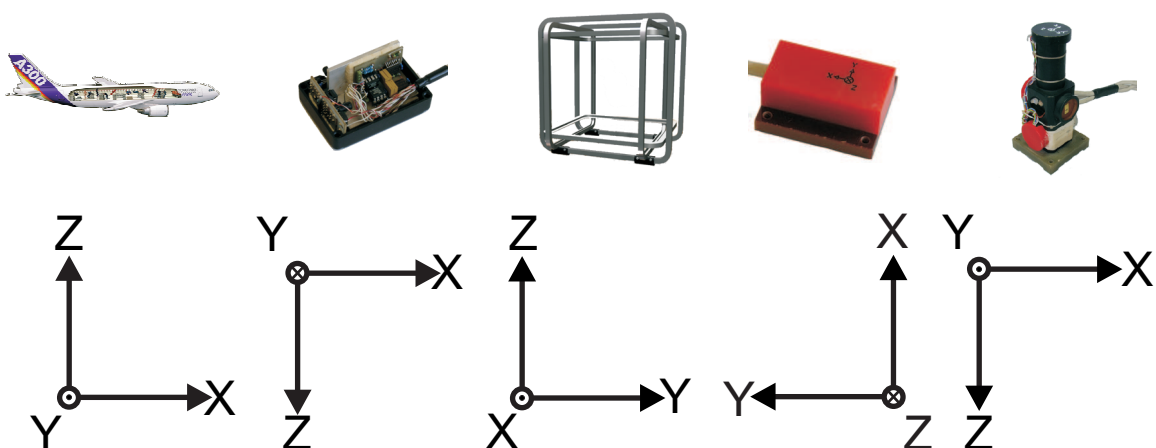


Abbildung 5.18: Koordinatensysteme der Komponenten des CAIN+ABEL-Aufbaus in Relation zu den Flugzeugkoordinaten. Von links nach rechts: Flugzeugkoordinaten, Beschleunigungssensor, Spulensystem, Steermagnetometer und Referenzmagnetometer.

5.5.3 Flugrouten

Die Flugrouten der ESA-Parabelflugkampagne 40 verliefen über dem Mittelmeer, da während der ganzen Kampagne die Wetterlage über dem Golf von Biskaya nicht stabil genug war. Im Gegensatz zu den Flügen der PFC 36 waren die Flugbedingungen aller Flüge der PFC 40 gut, so daß wenig Turbulenzen auftraten. Abbildung 5.19 zeigt die drei recht ähnlichen Trajektorien der Flüge am 28., 29. und 30.6.2005.

5.5.4 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Experimente verlief weitgehend ungestört. Die Staubkanone funktionierte im Rahmen ihrer Zuverlässigkeitsgrenzen (siehe Kapitel 5.1.2). Es konnten sowohl Datensätze der Beschleunigung und des Magnetfeldes als auch Videos während der Aggregationsvorgänge aufgezeichnet werden. Das Auffangen der entstandenen Aggregate mittels des Probensammelsystems verlief ohne Zwischenfälle.

Während der Versuche im Rahmen der CAIN+ABEL-Kampagne wurde das Magnetfeld im Versuchsraum wie geplant nicht nur kompensiert, sondern auch mittels eines Offsets auf einem vorher eingestellten, konstanten Wert gehalten. Dabei wurde das Feld in verschiedenen Sequenzen und mit verschiedenen Werten ein- und ausgeschaltet, um einen direkten Vergleich zwischen im magnetfeldfreien Raum gewachsenen Aggregaten und Aggregaten, die unter Einfluß eines äußeren Magnetfeldes gewachsen sind, ziehen zu können (siehe Kapitel 6.2.2). Die einzelnen Sequenzen können den Tabellen 6.3 und 6.4 entnommen werden. Sequenzen mit abwechselnder An- und Abwesenheit des externen Feldes wurden geflogen, da das Flugzeug nach jeder Reihe von fünf Parabeln die Richtung wechselt. Ein Richtungswechsel bewirkt eine komplett neue Position des Flugzeuges zur Nord- und Ostkomponente des Erdmagnetfeldes und führt somit zu komplett anderen Anforderungen an die einzelnen Spulen des Kompensationsspulensystems. Ein Einfluß dieser Änderungen auf das im Versuchsraum herrschende Magnetfeld ist zwar unwahrscheinlich, kann aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden, da das Spulensystem eine gewisse Trägheit der Kompensation aufweist.

Auch bei der PFC40 kam es beim ersten Flug zum Ausfall zweier Experimentatoren. Durch die Übernahme von Experimentierarbeiten durch Ersatzpersonal konnte das Experiment dennoch erfolgreich beendet werden. Im weiteren Verlauf der Kampagne kam es zu keinen weiteren Beeinträchtigungen des Experimentierpersonals.

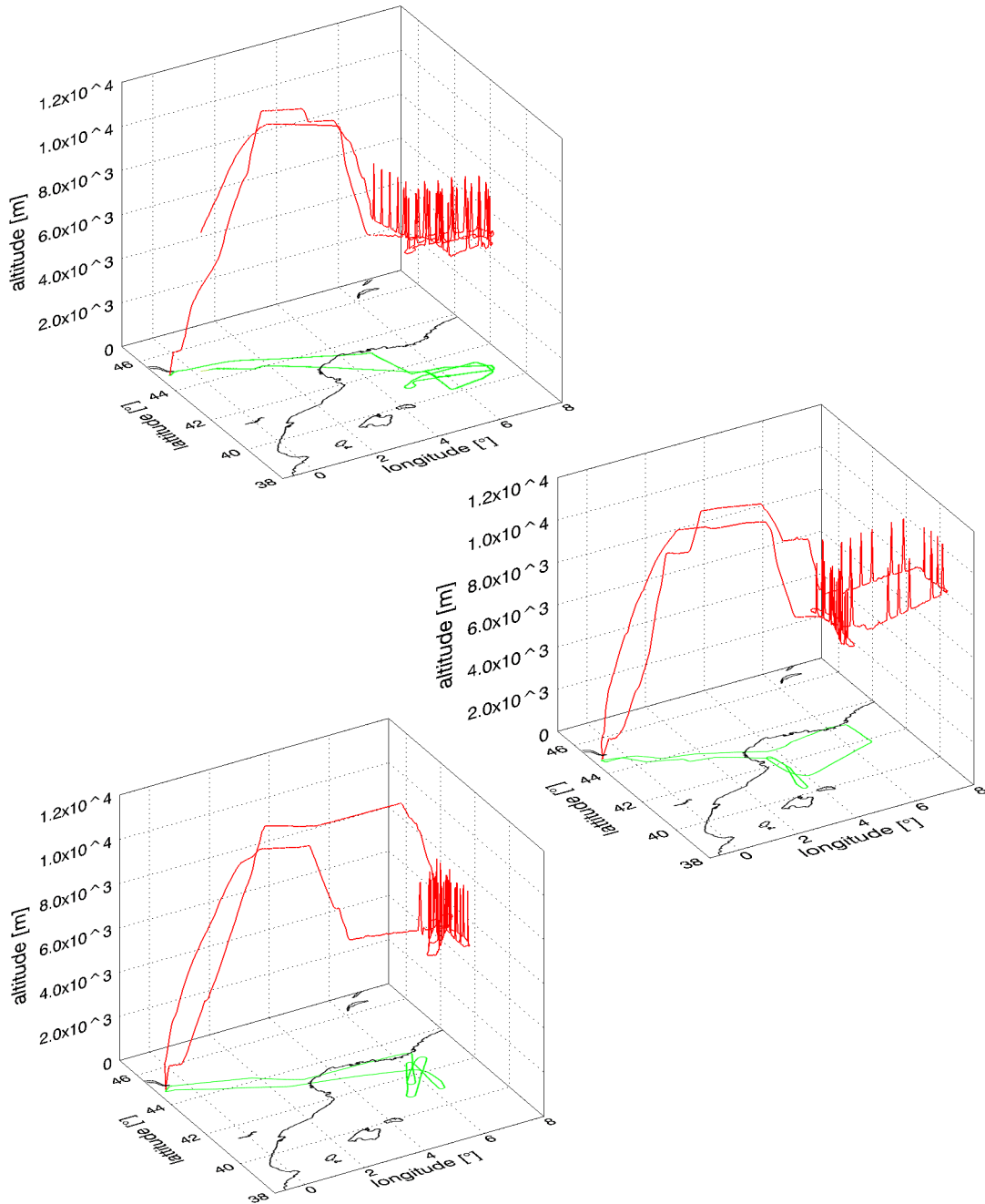


Abbildung 5.19: Flugrouten der Flüge der CAIN+ABEL-Kampagne: Die Flüge fanden vom 28. bis 30.6.2005 statt.

6 Auswertung, Ergebnisse und Diskussion

Nach der Durchführung der Experimente wurden die gewonnenen Daten der Auswertung zugeführt. Es wurden die aufgezeichneten Magnetfeld- und Beschleunigungsdaten in Beziehung zu den einzelnen Parabeln gesetzt und damit der Zusammenhang zwischen Daten, Videoaufzeichnungen und den auf den Probenträgern abgelagerten Aggregaten hergestellt. Die Probenträger wurden der Untersuchung unter einem Elektronenmikroskop zugeführt und Aufnahmen von den gesammelten Aggregaten erstellt. Dieses Kapitel stellt die gesammelten Ergebnisse dar und diskutiert sie.

6.1 ADAM+EVE-Experiment – ESA PFC 36

6.1.1 Beschleunigungsmessung und Separation der Parabeln

Aus den in den Flügen aufgezeichneten Datensätzen wurden die x-, y- und z-Komponenten der Beschleunigung extrahiert und aus ihnen die Gesamtbeschleunigung berechnet. Mit Hilfe dieser Daten ist es möglich, den Zeitpunkt des Beginns der einzelnen Parabeln („pull up“) und der Schwerelosigkeitsphasen („injection“) zu ermitteln. Sind diese Zeitpunkte bekannt, so können aus den Videodateien, die aufgrund ihres Erstellungsdatums mit den Beschleunigungs- und Magnetfelddaten synchronisiert werden können, die Sequenzen herausgeschnitten werden. Die so gewonnenen separierten Parabelfilmsequenzen werden dann der Einzelbildauswertung zugeführt.

Abbildung 6.1 zeigt die Beschleunigungswerte während der ersten Parabel des Fluges 218. Man erkennt deutlich den Zeitpunkt des Parabelbeginns („pull up“), des Beginns der Schwerelosigkeit nach der Übergangsphase („injection“) und den Zeitpunkt des Endes der Schwerelosigkeit („pull out“) (vgl. auch Kapitel 3.2).

6.1.2 Kompensation des Magnetfeldes im Versuchsraum

Aus den aufgenommenen Daten lassen sich mit Hilfe der aus den Beschleunigungsdaten separierten Parabeln die Magnetfelddaten extrahieren. Es stehen jeweils die x-, y- und z-Komponenten des Magnetfeldes zur Verfügung. Die Anordnung dieser Koordinaten innerhalb des Flugzeuges kann Kapitel 5.4.2 entnommen werden. Aus diesen Komponenten lassen sich Richtung und Stärke des im Flugzeug wirkenden Magnetfeldes ermitteln. Abbildung 6.2 zeigt den Verlauf des Betrages des Feldes an Bord während der 1. Parabel des

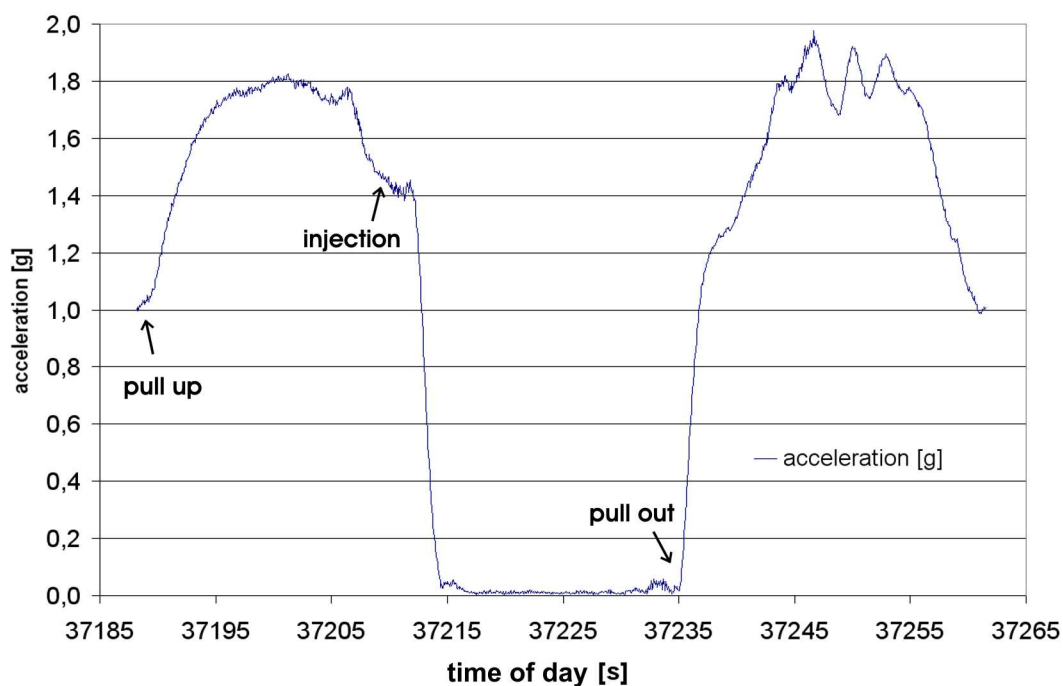


Abbildung 6.1: Beschleunigung während der 1. Parabel des Fluges 218.

Fluges 218. Man erkennt leichte Variationen des Magnetfeldes zwischen 20 und 120 nT. Es ist also gelungen Störfelder an Bord des Flugzeuges auf unter zwei Promille des Erdmagnetfeldes zu senken. Das Rauschen der Feldwerte ist auf die Trägheit des Systems zurückzuführen. Der schwankende Gesamtverlauf des Feldes während einer Parabel läßt auf eine Selbstmagnetisierung des Magnetometers schließen, da eine erforderliche Entmagnetisierung des Gerätes nur zwischen den Parabeln durchgeführt werden konnte.

Zum Vergleich sind in Abbildung 6.3 die Magnetfeldverläufe zweier Parabeln aufgetragen, in denen die Magnetfeldkompensation deaktiviert war. In diesem Fall sind es die Parabeln 20 und 21 des Fluges 218.

Wie erwartet liegen die gemessenen Feldwerte im Bereich zwischen 45.000 und 50.000 nT, was deutlich das Erdmagnetfeld widerspiegelt. Zwischen den Parabeln 20 und 21 liegt nach der Sequenz der geflogenen Parabeln (siehe Kapitel 3.5) eine planmäßige Pause. In dieser Zeit werden von den Piloten Kurskorrekturen und Wendemanöver ausgeführt. Diese Kursänderung kann man deutlich in der zweiten Grafik der Abbildung erkennen, in der der Verlauf des Magnetfeldes komplett von dem in Parabel 20 differiert. Im Gegensatz zu Parabel 20 steigt in Parabel 21 das Feld zunächst an, um im späteren Verlauf des Parabelmanövers auf Werte um den Ursprungswert abzufallen.

Es ist also mit Hilfe des verwendeten Spulensystems während der ADAM+EVE-Kampagne gelungen, sowohl das Erdmagnetfeld als auch Störfelder anderer Experimente und des Flugzeuges, die auf den Aggregationsprozeß wirken, auf einen Wert unterhalb 200 nT zu reduzieren. Es ist also gelungen den Einfluß der Felder auf unter ein Prozent im Vergleich zu den unkompenzierten Experimenten abzuschwächen.

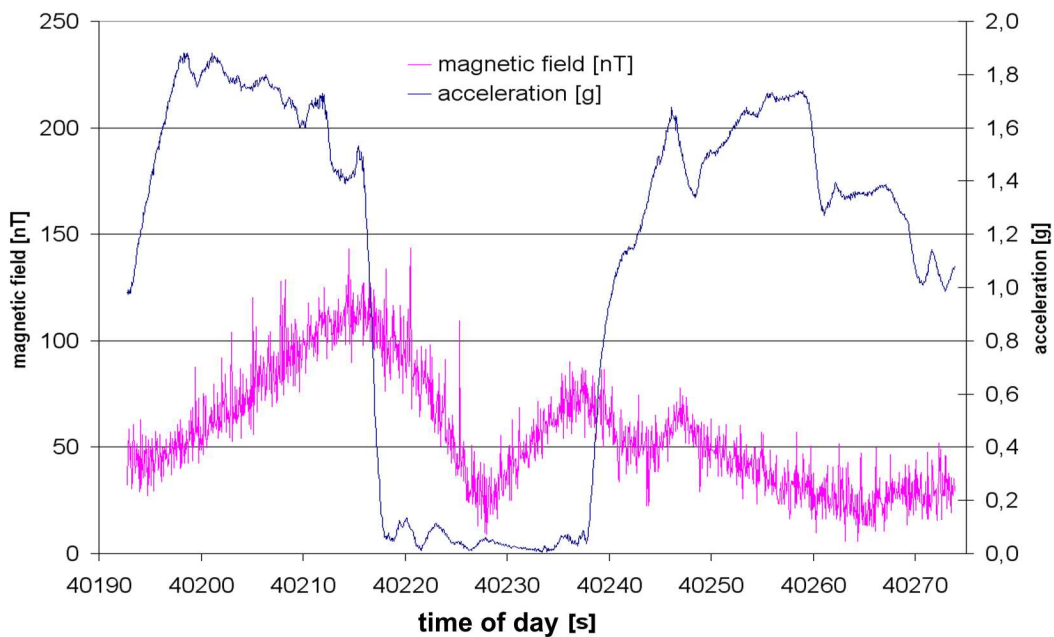


Abbildung 6.2: Magnetfeldkompensation während des ADAM+EVE-Experimentes: Die Grafik zeigt den Verlauf der Beschleunigung und des Magnetfeldes während der 11. Parabel des Fluges 218. In dieser Parabel war die Kompensation eingeschaltet. Man erkennt am Verlauf der Beschleunigungskurve sowohl den Zeitpunkt des „Pull up“ als auch des „Injection“ und des „Pull Out“. Das gemessene Magnetfeld variiert im Zeitraum zwischen „Pull Up“ und dem Ende des Manövers leicht zwischen 20 nT und 120 nT.

Während der Durchführung wurden zu Vergleichszwecken auch Experimente unter unkompenzierten Bedingungen durchgeführt. Die folgenden Tabellen 6.1 und 6.2 zeigen eine Übersicht der Bedingungen während der Durchführung der Experimente. Während des ersten Fluges (218) wurde unter Kompensation der Störfelder Bariumferritstaub in die Vakuumkammer eingeschossen. Im zweiten Flug (219 und 220) wurden zu Vergleichszwecken analoge Experimente jeweils mit aktivierter und deaktivierter Kompensation durchgeführt, während beim dritten Flug der ADAM+EVE-Kampagne Mischungen aus Silikat und Bariumferrit unter kompensiertem und unkompenziertem Feld in die Vakuumkammer eingeschossen wurden.

Die Struktur der gewachsenen Aggregate und der Ausrichtungswinkel der Aggregate werden in den Kapiteln 6.3 und 6.5 näher betrachtet.

Flug	Parabel	Eingestelltes Magnetfeld [nT]			Gemessenes Magnetfeld [nT]			Eingeschossener Staub
		B_x	B_y	B_z	B_x	B_y	B_z	
1	2	0	0	0	55 ± 50	4 ± 15	-125 ± 10	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	3	0	0	0	55 ± 50	4 ± 15	-124 ± 10	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	4	0	0	0	56 ± 49	4 ± 15	-125 ± 10	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	6	0	0	0	59 ± 51	3 ± 15	-124 ± 10	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	7	0	0	0	62 ± 49	2 ± 15	-125 ± 20	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	8	0	0	0	59 ± 49	3 ± 14	-127 ± 11	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	9	0	0	0	51 ± 49	5 ± 15	-126 ± 11	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	12	0	0	0	22 ± 51	-25 ± 16	15 ± 14	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	14	0	0	0	19 ± 52	-26 ± 16	20 ± 13	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	15	0	0	0	24 ± 51	-26 ± 16	17 ± 12	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	17	0	0	0	16 ± 50	-24 ± 16	19 ± 18	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	2	0	0	0	5 ± 51	-17 ± 15	-0,4 ± 12	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	7	0	0	0	-13 ± 51	2 ± 16	-48 ± 15	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	8	0	0	0	-12 ± 50	2 ± 16	-49 ± 13	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	10	0	0	0	97 ± 55	-24 ± 16	-65 ± 9	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	12	0	0	0	72 ± 54	-2 ± 16	-116 ± 10	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	13	0	0	0	64 ± 54	-0,2 ± 17	-118 ± 16	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	14	0	0	0	64 ± 54	0,1 ± 15	-120 ± 11	BaFe ₁₂ O ₁₉

Tabelle 6.1: Einschubliste ADAM+EVE: Aufgelistet sind die durchgeführten Experimente während des ersten und zweiten Fluges der ADAM+EVE-Kampagne.

Flug	Parabel	Eingestelltes Magnetfeld [nT]			Gemessenes Magnetfeld [nT]			Eingeschossener Staub
		B_x	B_y	B_z	B_x	B_y	B_z	
2	17	-	-	-	-8136 ± 19376	37227 ± 5466	15818 ± 5523	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	18	-	-	-	-8207 ± 19194	37005 ± 5635	16330 ± 4870	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	19	-	-	-	-8317 ± 19586	37015 ± 5837	16116 ± 5602	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	20	-	-	-	-7783 ± 19686	36714 ± 5294	16564 ± 5879	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	21	-	-	-	-8322 ± 19768	36777 ± 5389	16148 ± 5998	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	22	-	-	-	-9423 ± 18743	37365 ± 5997	15135 ± 5756	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	23	-	-	-	-11449 ± 20318	36410 ± 7130	13090 ± 8593	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	24	-	-	-	-9135 ± 20726	96091 ± 7276	15378 ± 6570	BaFe ₁₂ O ₁₉
3	1	-	-	-	-6952 ± 19578	37250 ± 5240	15810 ± 5523	BaFe ₁₂ O ₁₉
3	3	-	-	-	-8420 ± 19503	36976 ± 5491	15530 ± 5395	BaFe ₁₂ O ₁₉
3	6	-	-	-	-17846 ± 18878	39238 ± 8799	-8752 ± 5408	BaFe ₁₂ O ₁₉
3	7	-	-	-	-17941 ± 19645	38848 ± 8790	-5441 ± 6134	BaFe ₁₂ O ₁₉
3	8	-	-	-	-18039 ± 19418	39108 ± 8813	-6451 ± 5723	BaFe ₁₂ O ₁₉
3	11	-	-	-	20388 ± 19395	36919 ± 9784	12722 ± 6414	BaFe ₁₂ O ₁₉
3	12	-	-	-	20348 ± 18892	36420 ± 10053	14750 ± 5375	BaFe ₁₂ O ₁₉
3	17	0	0	0	-6 ± 45	1 ± 16	-59 ± 16	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ ; 3:1
3	18	0	0	0	-6 ± 45	1 ± 14	-60 ± 14	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ ; 3:1
3	20	0	0	0	8 ± 49	2 ± 15	-79 ± 13	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ ; 3:1
3	22	0	0	0	87 ± 61	-30 ± 19	-45 ± 11	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ ; 3:1
3	25	0	0	0	260 ± 3059	-338 ± 5280	174 ± 4104	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ ; 3:1
3	26	0	0	0	5 ± 47	8 ± 15	-99 ± 13	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ ; 3:1

Tabelle 6.2: Einschlußliste ADAM+EVE: Aufgelistet sind die durchgeführten Experimente während des zweiten und dritten Fluges der ADAM+EVE-Kampagne.

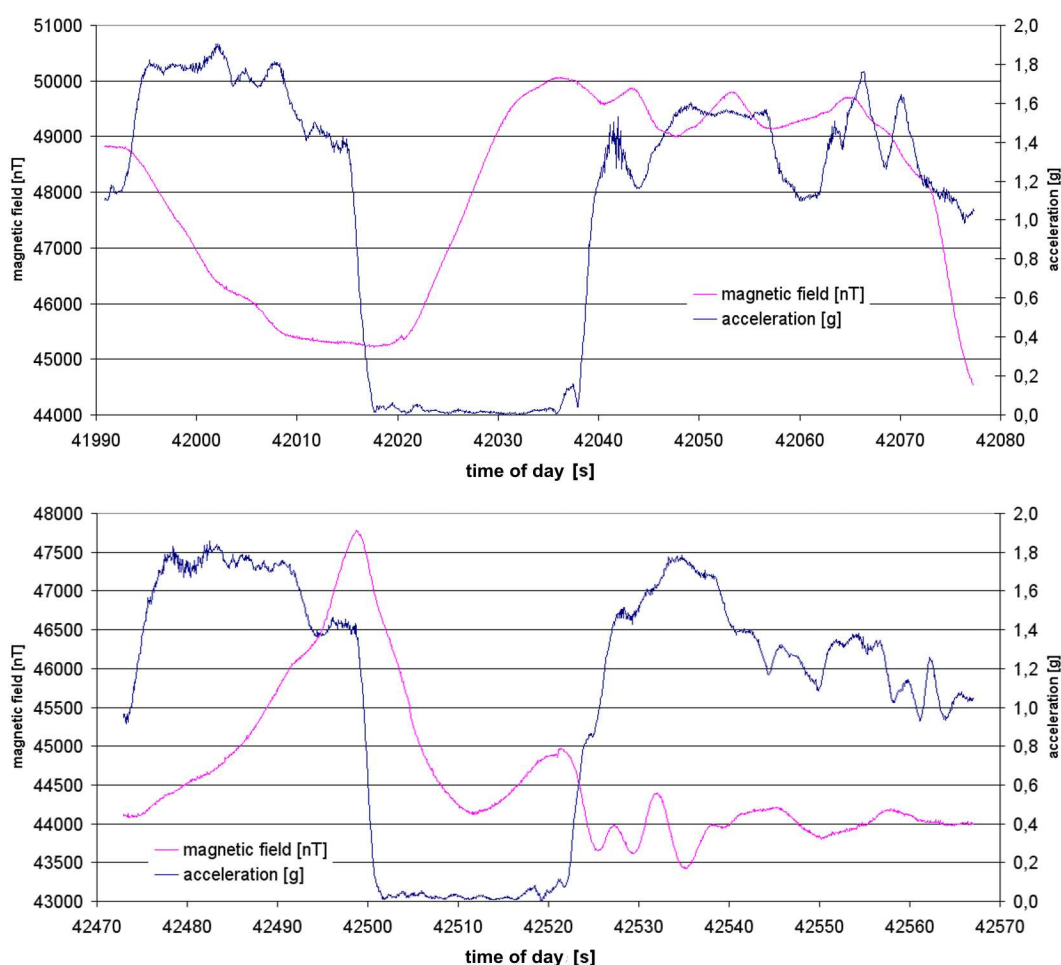


Abbildung 6.3: Magnetfeld während des ADAM+EVE-Experimentes: Die Grafik zeigt den Verlauf der Beschleunigung und des Magnetfeldes während der Parabeln 20 und 21 des Fluges 218. In diesen Parabeln war die Kompensation zu Vergleichszwecken deaktiviert. Im Gegensatz zum gemessenen Magnetfeld in Abbildung 6.2 liegt der hier gemessene Betrag des Feldes im Bereich zwischen 45.000 nT und 50.000 nT, was der Stärke des Erdmagnetfeldes entspricht. Deutlich ist der differierende Verlauf des Magnetfeldes der beiden Parabeln untereinander zu erkennen, der auf eine Kursänderung zurückzuführen ist.

6.2 CAIN+ABEL-Experiment – ESA PFC 40

6.2.1 Separation der Parabeln

Analog zur Separation der Parabeln der ADAM+EVE-Kampagne wurden mit dem gleichen Verfahren auch die Daten der Versuche während der CAIN+ABEL-Kampagne verarbeitet. Die Separation der Parabeln der *in-situ*-Aufnahmen aus der Vakuumkammer wurde deutlich vereinfacht, indem während jeder Parabel eine neue Filmsequenz gestartet wurde, so daß sich die Bearbeitung der Filmaufnahmen auf das Kürzen dieser Sequenzen auf den Teil der Parabel reduzierte, in dem Mikrogravitation bzw. Hypergravitation wirkte.

6.2.2 Manipulation des Magnetfeldes im Versuchsraum

Im Gegensatz zur vorhergehenden ADAM+EVE-Kampagne sollten die Aggregationsexperimente während der Versuche der CAIN+ABEL-Kampagne nicht nur unter magnetisch neutralen Bedingungen, sondern auch unter definierten Feldern durchgeführt werden. Die dazu modifizierte Elektronik der Spulensystemsteuerung ist in der Lage, einen Offset auf das jeweils kompensierte Magnetfeld zu legen (siehe Kapitel 5.3.2). Abbildung 6.4 zeigt den Verlauf des Magnetfeldes während einer Parabel, in der kein Offset angelegt war. Man kann erkennen, daß die gemessenen Feldwerte mit Werten zwischen 5 und 40 nT unter denen der ADAM+EVE-Kampagne liegen. Dies verdeutlicht, daß die Modifikation der Elektronik nicht nur das Anlegen eines Offsets, sondern auch eine deutliche Verbesserung der Kompensationsleistung ermöglicht.

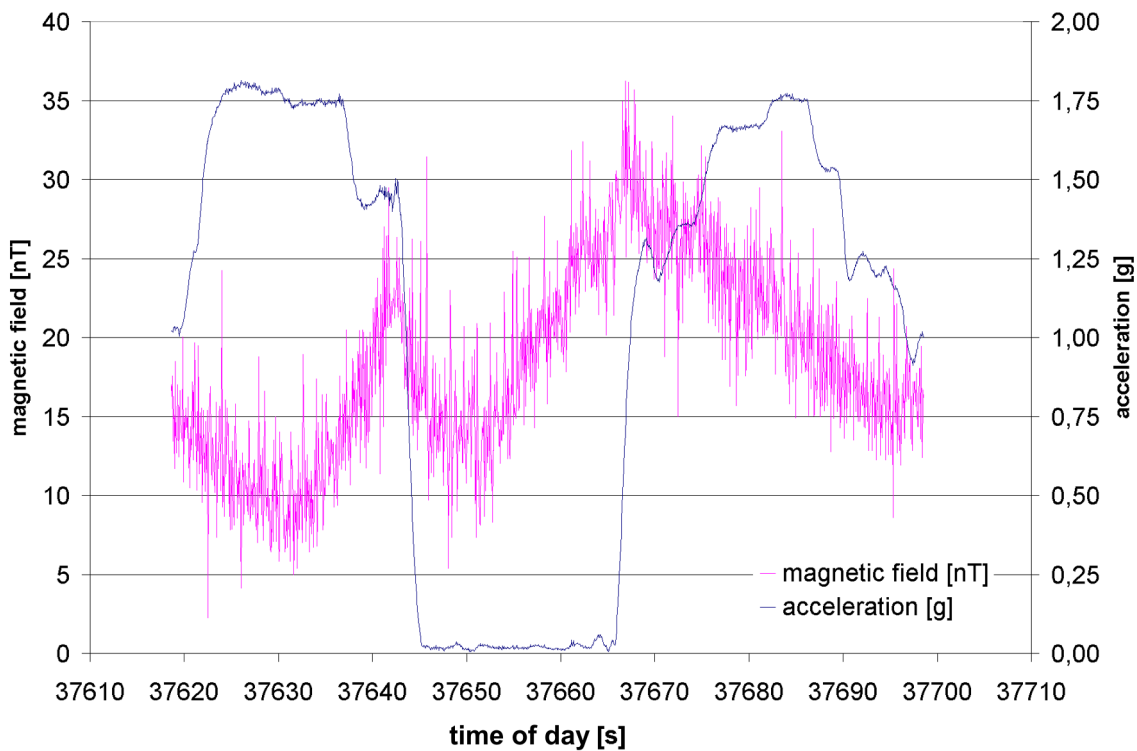


Abbildung 6.4: Magnetfeldkompensation während des CAIN+ABEL-Experimentes: Aufgetragen sind die Beschleunigung sowie der Betrag des vom Steuermagnetometer gemessenen Magnetfeldes. Die Beschleunigung ist auf der Sekundärachse aufgetragen.

Neben der Kompensation des Feldes wurde während eines Teiles der Parabeln die oben angesprochene Anlegung eines Offsets durchgeführt. Die beiden Grafiken der Abbildung 6.5 zeigen den Verlauf des Feldes während zweier Parabeln, in denen jeweils andere Offsets angelegt wurden.

Für die Grafiken wurde die Meßwerte des Referenzmagnetometers verwendet, da bei der Aufnahme der Daten des Steuermagnetometers Fehler auftraten. Die bei höherem anliegenden Magnetfeld aufgenommenen Daten des Steuermagnetometers waren unbrauch-

bar. Dies beeinflusste die Leistung des Spulensystems und damit des kompensierten bzw. angelegten Magnetfeldes nicht, da der Fehler bei der Übertragung der Daten für die Aufzeichnung und nicht im Magnetometer selber auftrat, wie an den Daten des Referenzmagnetometers zu erkennen ist.

Das Referenzmagnetometer liefert jedoch nicht das Feld im Zentrum des Spulensystems, in dem die Vakuumkammer montiert ist, sondern Meßwerte für eine Position etwa 15 cm neben dem Zentrum der Kammer, da das Referenzmagnetometer aus Platzgründen nicht näher an der Kammer montiert werden konnte (siehe auch Kapitel 5.2.1). Da aber bereits in wenigen Zentimetern Entfernung vom Zentrum des Spulensystems, beziehungsweise von dem Punkt, an dem das Steuermagnetometer positioniert ist, Abweichungen vom angelegten Feld auftreten (siehe Abbildung 5.14), liegen die Meßwerte des Referenzmagnetometers leicht neben den wahren Feldwerten im Versuchsraum. Aus Grafik 5.14, die den gemessenen Feldverlauf im Spulensystem bei voller Kompensationsleistung zeigt, kann das Magnetfeld in 15 cm Distanz zum Zentrum des Spulensystems zu etwa 3.000 bis 4.000 nT bestimmt werden, was mit den Meßwerten des Referenzmagnetometers übereinstimmt. Im Vergleich mit den höheren eingestellten Offsets, die zusammen mit allen anderen relevanten Informationen der Flüge der CAIN+ABEL-Kampagne in den Tabellen 6.3 und 6.4 dargestellt sind, liegen die gemessenen Werte des Referenzmagnetometers teilweise deutlich über und unter den eingestellten Werten. Es zeigen sich Abweichungen bis zu 20.000 nT, die auf die Positionierung des Referenzmagnetometers zurückzuführen sind. Dennoch lassen sich die Daten zur Kontrolle der Funktionsfähigkeit des Spulensystems samt Elektronik verwenden, da sie mit den eingestellten Offsetwerten skalieren.

In Abbildung 6.5 lassen sich neben den Beschleunigungsmeßwerten deutlich die vom Referenzmagnetometer gemessenen Magnetfelder während zweier Parabeln mit verschiedenen Einstellungen der Offsetwerte erkennen. In der siebenten Parabel des Fluges 266 liegen die Magnetfeldwerte mit etwa 70.000 nT aus oben genannten Gründen deutlich über dem eingestellten Offset von 50.000 nT. Auch die untere Grafik zeigt mit über 100.000 nT in der sechsten Parabel des Fluges 267 einen deutlich höheren Meßwert als der eingestellte Offset.

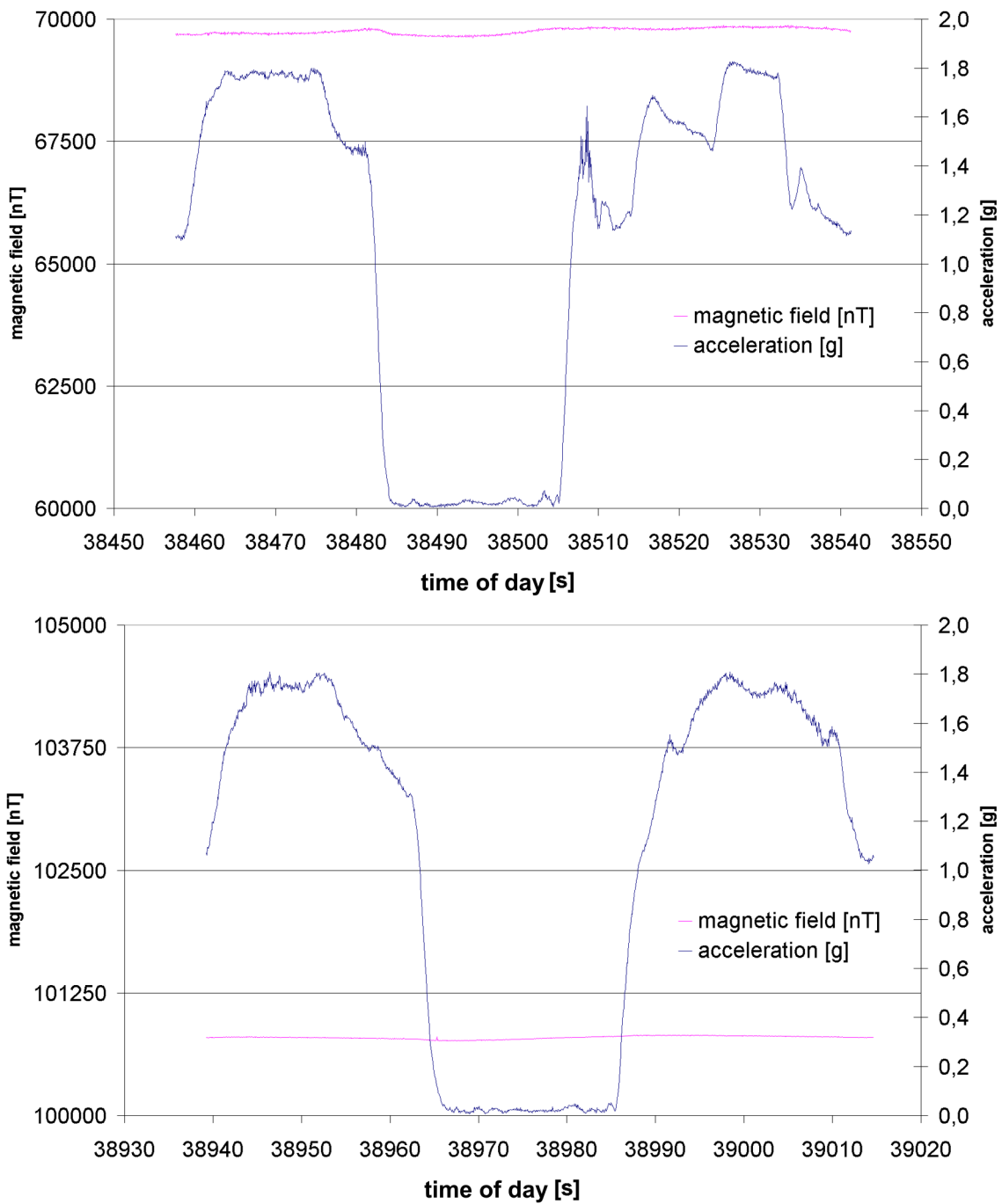


Abbildung 6.5: Magnetfeldmanipulation während des CAIN+ABEL-Experimentes: Aufgetragen sind von der 7. Parabel des Fluges 266 und der 6. Parabel des Fluges 267 die Beschleunigungsmesswerte und die vom Referenzmagnetometer gemessenen Magnetfeldwerte. Die Beschleunigung ist jeweils auf der Sekundärachse aufgetragen.

Flug	Parabel	Eingestelltes Magnetfeld [nT]			Gemessenes Magnetfeld [nT]			Eingeschossener Staub
		B_x	B_y	B_z	B_x	B_y	B_z	
1	2	0	0	0	-4483 ± 163	5116 ± 139	-578 ± 106	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	3	0	0	0	-4479 ± 138	5100 ± 55	-571 ± 98	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	7	0	0	50.000	-4073 ± 147	9252 ± 140	69019 ± 50	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	8	0	0	50.000	-4124 ± 150	9227 ± 120	69023 ± 46	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	10	0	0	50.000	-4204 ± 158	9108 ± 111	69824 ± 92	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	16	0	0	0	-4526 ± 161	5020 ± 47	864 ± 72	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	17	0	0	0	-4534 ± 153	5034 ± 35	892 ± 55	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	18	0	0	50.000	-3547 ± 142	10014 ± 137	80632 ± 57	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	19	0	0	50.000	-3546 ± 166	10020 ± 151	80589 ± 54	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	21	0	0	0	-4636 ± 155	4860 ± 34	984 ± 59	BaFe ₁₂ O ₁₉
1	22	0	0	50.000	-3695 ± 160	9779 ± 129	79610 ± 149	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	1	0	0	0	_*	_*	_*	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	2	0	0	70.000	_*	_*	_*	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	4	0	0	0	-3509 ± 151	4483 ± 66	589 ± 100	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	5	0	0	70.000	-2916 ± 139	9227 ± 81	66221 ± 110	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	6	0	0	0	-3787 ± 162	4634 ± 74	2097 ± 114	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	7	0	0	70.000	-2840 ± 155	12295 ± 101	10.0003 ± 0**	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	8	0	0	0	-3788 ± 162	4636 ± 66	2127 ± 103	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	9	0	0	70.000	-2848 ± 167	12215 ± 94	10.0003 ± 0**	BaFe ₁₂ O ₁₉

Tabelle 6.3: Einschlußliste CAIN+ABEL: Aufgelistet sind die durchgeführten Experimente während des ersten und der ersten Hälfte des zweiten Fluges der CAIN+ABEL-Kampagne.

* Wegen eines Datenverlustes aufgrund eines Stromausfalls stehen die Meßwerte für diese Parabeln nicht zur Verfügung. Die *in-situ*-Aufnahmen und gesammelte Proben sind hiervon nicht betroffen.

** Standardabweichungen von 0 deuten darauf hin, daß die Meßwerte oberhalb des Meßbereichs liegen und daher das Meßgerät nur noch Maximalwerte geliefert werden.

Flug	Parabel	Eingestelltes Magnetfeld [nT]			Gemessenes Magnetfeld [nT]			Eingeschossener Staub
		B_x	B_y	B_z	B_x	B_y	B_z	
2	10	0	0	0	-3783 ± 167	4603 ± 67	2163 ± 112	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	16	0	0	0	-3507 ± 172	4725 ± 36	2248 ± 45	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	18	0	0	0	-3628 ± 207	4746 ± 78	2187 ± 63	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	20	70.000	0	70.000	61197 ± 206	8283 ± 78	97845 ± 58	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	22	0	0	0	-3718 ± 165	4654 ± 68	2217 ± 102	BaFe ₁₂ O ₁₉
2	24	70.000	0	70.000	61164 ± 249	7874 ± 78	94865 ± 130	BaFe ₁₂ O ₁₉
3	1	0	0	0	-3626 ± 147	4622 ± 43	709 ± 59	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	2	0	0	50.000	-2790 ± 144	6842 ± 336	47636 ± 86	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	3	0	0	0	-3536 ± 170	4598 ± 57	796 ± 100	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	4	0	0	50.000	-2725 ± 163	6818 ± 301	47681 ± 111	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	5	0	0	0	-3469 ± 146	4566 ± 71	845 ± 99	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	8	0	0	50.000	-3108 ± 165	6817 ± 300	47654 ± 121	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	16	50.000	0	0	41486 ± 187	2616 ± 61	2245 ± 93	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	17	0	50.000	0	-2175 ± 258	50532 ± 110	-446 ± 363	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	18	50.000	0	0	41429 ± 169	2609 ± 65	2241 ± 94	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	19	0	50.000	0	-2165 ± 167	50485 ± 98	-447 ± 364	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	20	50.000	0	0	41424 ± 199	2614 ± 80	2233 ± 95	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	21	0	50.000	0	-1866 ± 151	50354 ± 68	-393 ± 319	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1
3	22	50.000	0	0	41731 ± 160	2476 ± 67	2281 ± 88	BaFe ₁₂ O ₁₉ +SiO ₂ , 3:1

Tabelle 6.4: Einschlußliste CAIN+ABEL: Aufgelistet sind die durchgeführten Experimente während der zweiten Hälfte des zweiten Fluges und des dritten Fluges der CAIN+ABEL-Kampagne.

6.3 Ausrichtung der Aggregate unter verschiedenen Feldbedingungen

Während der Experimente der CAIN+ABEL-Kampagne gelang es leider nur ein einzelnes Aggregat *in-situ* aufzunehmen, so daß sich die Auswertung der Ausrichtung der entstandenen Aggregate auf die Untersuchung der mit Hilfe des Probensammelmechanismus (vgl. Kapitel 5.1.1) auf den Objektträgern gesammelten Aggregate stützt. Das einzige brauchbare Aggregat auf den Videoaufnahmen ist in Abbildung 6.6 gezeigt. Da es sich um ein einzelnes Aggregat handelt, ist es nicht möglich den Durchschnittswinkel und daraus die Abweichung zu bestimmen, wie es für Aggregate der ADAM-Kampagne durchgeführt wurde (vgl. Kapitel 4.3).

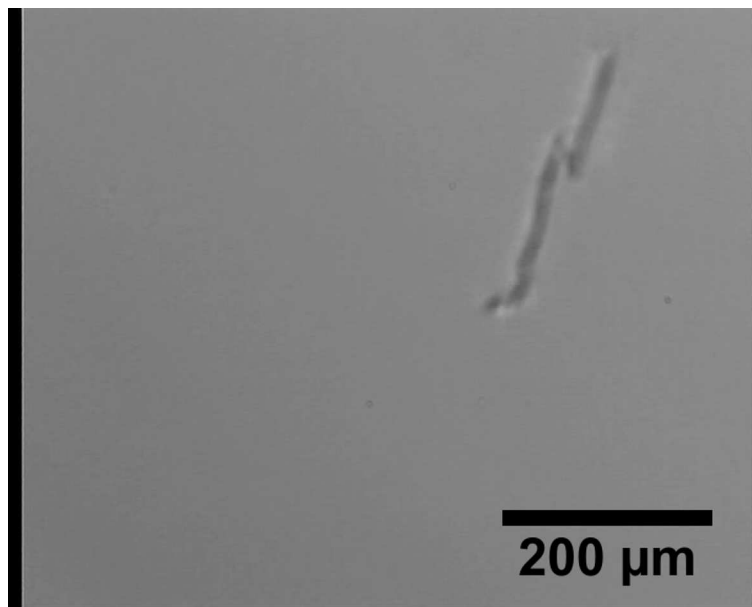


Abbildung 6.6: *In-situ*-Aufnahme eines Aggregates der CAIN+ABEL-Kampagne, aufgenommen während der dritten Parabel des dritten Fluges. Man erkennt ein langes, kettenförmiges Aggregat mit einem Bruch.

Die Analyse der Ausrichtungswinkel der Aggregate auf den Bildern des Elektronenmikroskops (SEM) wurde analog zu der Auswertung der *in-situ*-Aufnahmen durchgeführt. Die Ausrichtungswinkel sind auch in diesem Fall Projektionen der realen Ausrichtungswinkel auf die Beobachtungsebene, die im Fall der Probenträger senkrecht zur Bildaufnahmeebene der CCD-Kamera liegt. Eine Bestimmung des absoluten Ausrichtungswinkels für Aggregate auf den Probenträgern ist unmöglich, da diese sowohl in der Probenkapsel und auf den Transportwegen als auch beim Einbau in die Beobachtungskammer des SEM beweglich gelagert sind.

Um einen Überblick über die aufgefangenen Aggregate zu erhalten, wurden von ausgewählten Probenträgern zunächst Übersichtsaufnahmen mittels des SEM mit einem Vergrößerungsfaktor von 200 angefertigt. Von auffälligen Aggregaten wurden dann Detailbil-

der mit verschiedenen Vergrößerungsstufen zwischen 500 und 4000 angefertigt. Für die Analyse der Ausrichtungswinkel der Aggregate wurden jeweils Bildausschnitte in 500-facher Vergrößerung aus vier Einzelbildern zusammengesetzt. Diese zeigen eine Fläche von $300 \times 300 \mu\text{m}^2$, was für eine aussagekräftige Statistik der Aggregate ausreicht.

Auf den SEM-Bildern war eine tendenzielle Ausrichtung der während der Experimente mit anliegendem Magnetfeld erzeugten, kettenförmigen Aggregate zu erkennen. Abbildung 6.7 zeigt zwei dieser Bilder, auf denen deutlich eine Vorzugsrichtung der Aggregate zu erkennen ist. Die beiden Bilder wurden von Probenträgern aufgenommen, die während der 7. und 18. Parabel des ersten Fluges der CAIN+ABEL-Kampagne Aggregate auffingen. Während dieser Parabeln war jeweils auf einer Achse des Spulensystems ein Magnetfeldoffset von 50.000 nT angelegt, der Betrag des während der Aggregation wirkenden Feldes betrug also 50.000 nT.

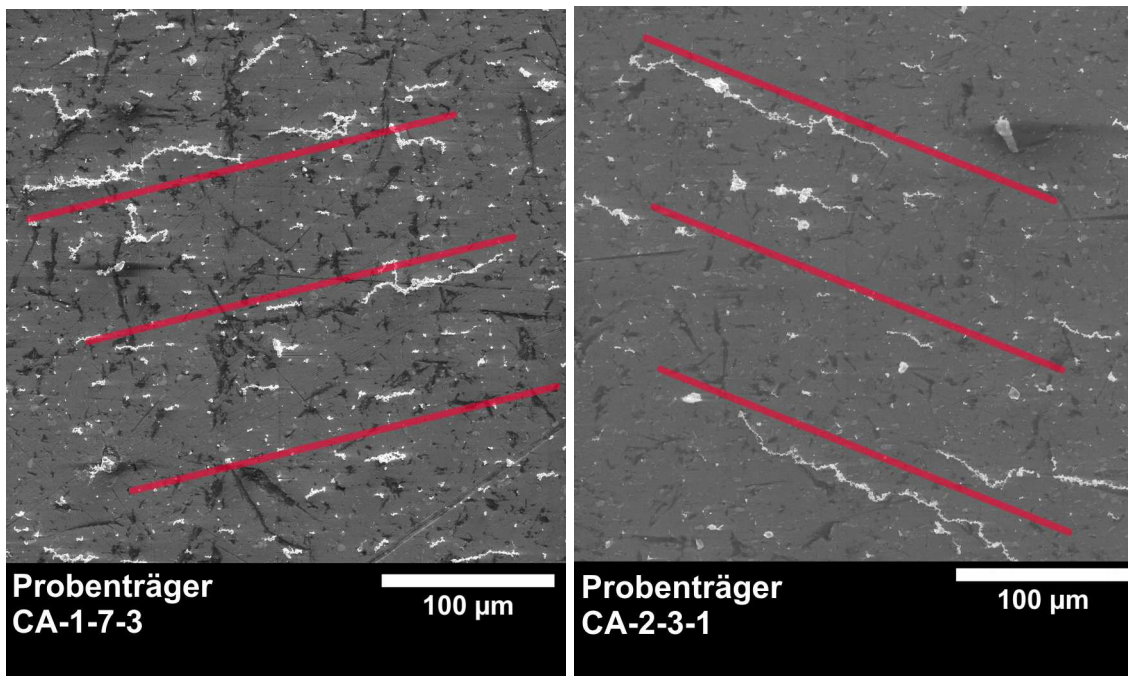


Abbildung 6.7: Beispiele für Aggregatausrichtung: Beide Aufnahmen wurden von Probenträgern gemacht, die Aggregate während des ersten Fluges der CAIN+ABEL-Kampagne auffingen. Die Aufnahmen zeigen jeweils einen Ausschnitt der Oberfläche des Probenträgers in 500-facher Vergrößerung, die Bildbreite beträgt $360 \mu\text{m}$. Der Probenträger der linken Aufnahme sammelte während der 7. Parabel der ersten Fluges, der auf der rechten Seite während der 18. Parabel Aggregate. Die roten Linien verdeutlichen die Vorzugsrichtung der Ausrichtung eines großen Teils der Aggregate auf dem Probenträger aufgrund des angelegten konstanten Magnetfeldes.

In Abbildung 6.8 sind zum Vergleich einige Übersichtsaufnahmen von Probenträgern dargestellt, die unter anderen magnetischen Bedingungen gewachsene Aggregate aufgefangen haben. Man erkennt im linken Bild in der oberen linken Ecke eine komplexe Struktur, die unter einem Feld von 70.000 nT entstanden ist. Die Struktur befindet sich nicht kom-

plett auf dem Bild. Sie besteht aus mehreren Ringen und Ketten, die miteinander verbunden sind. Dies erschwert eine genaue Bestimmung der Ausrichtung, weil eine eindeutige Zuordnung von Anfang und Ende des Aggregates nicht möglich ist.

Das rechte Bild in Abbildung 6.8 zeigt die typische Oberfläche eines Probenträgers, der im nahezu feldfreien Raum gewachsene Aggregate aufgefangen hat. Man erkennt viele kleine Strukturen sowie einige etwas größere Aggregate. Auf dem Bild ist keinerlei Vorzugsrichtung der Aggregatketten zu erkennen.

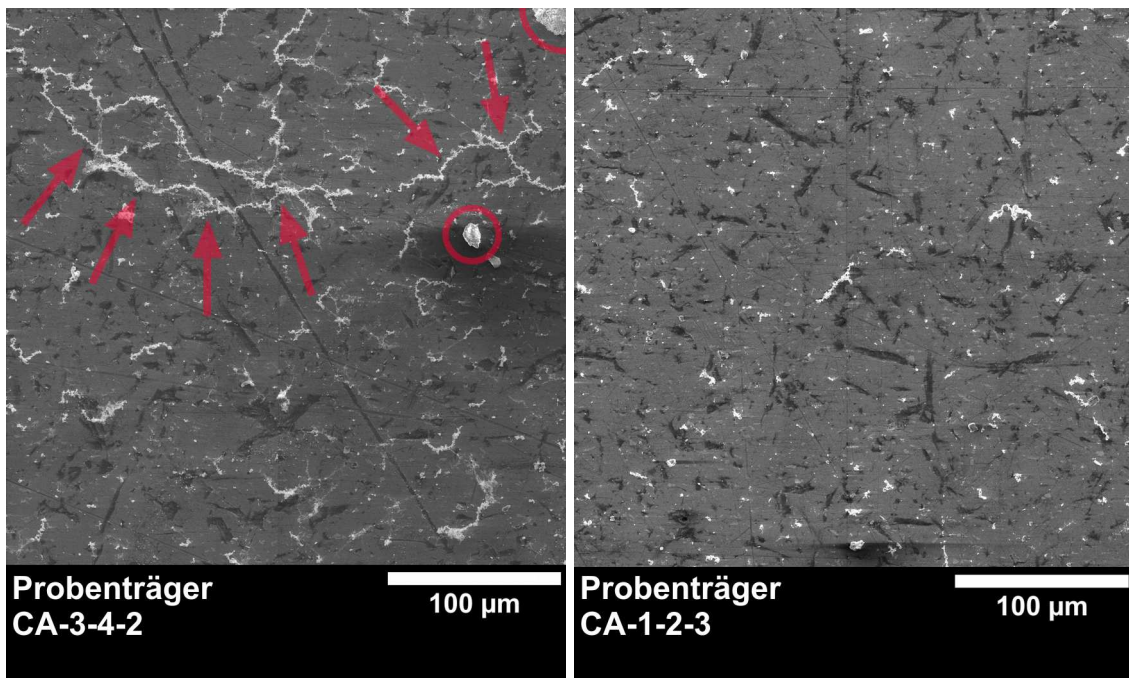


Abbildung 6.8: Beispiele für Aggregate: Die Pfeile auf dem linken Bild markieren zwei Aggregate mit komplexer Struktur, die sich teilweise bis über den Bildrand hinaus erstrecken. Die eingekreisten Partikel sind Verunreinigungen auf dem Probenträger beziehungsweise nicht deagglomeriertes Material vom Staubeinschuß, das sich auf der Oberfläche abgelagert hat. Das rechte Bild zeigt die Oberfläche eines Probenträgers, der Aggregate aufgefangen hat, die ohne Führungsfeld, also unter kompensierten Bedingungen gewachsen sind.

Für die statistische Betrachtung der Aggregate wurden mehr als 30 dieser Übersichtsaufnahmen hinsichtlich Aggregatausrichtung und Aggregatlänge ausgewertet. Die Aufnahmen stammen von Probenträgern, die unter verschiedenen magnetischen Bedingungen Aggregate aufgefangen haben. Es wurden insgesamt 228 Aggregate zur Ausrichtungs- auswertung herangezogen.

Die gemessenen Winkel auf der Oberfläche der Probenträger sind für die Ausrichtung der Partikel während des Aggregationsvorgangs signifikant, da der Ausrichtungswinkel in der Horizontalebene bei der Ablagerung erhalten bleibt. Abbildung 6.9 verdeutlicht den Vorgang: Ein zunächst in der Schwebe befindliches Aggregat (a) lagert sich unter Erhaltung

des Ausrichtungswinkels α auf der Oberfläche eines Probenträgers ab (b). Die Projektion des Aggregates auf die Oberfläche des Probenträgers in Abbildung (a) verdeutlicht den horizontalen Ausrichtungswinkel im schwebenden Zustand, der in (b) nach der Ablagerung erhalten bleibt.

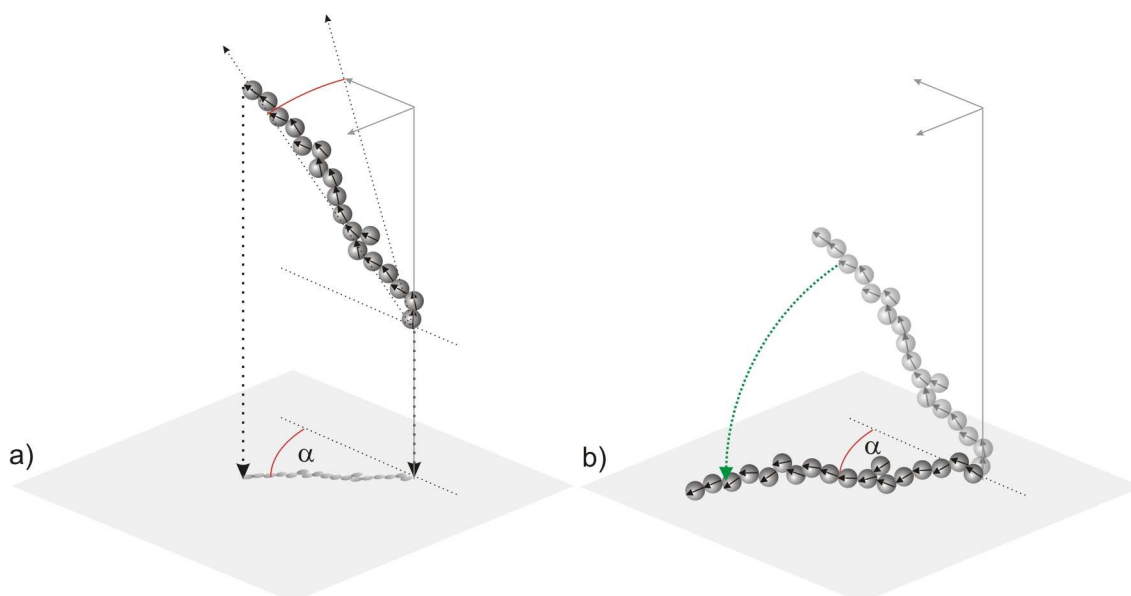


Abbildung 6.9: Schematische Darstellung der Ablagerung eines Partikels auf der Oberfläche eines Probenträgers. Das in Abbildung (a) schwebende Aggregat fällt während der Hypergravitationsphase auf die Oberfläche des Probenträgers (graue Fläche). Dabei ändert sich der Ausrichtungswinkel relativ zur Probenträgeroberfläche nicht. Verdeutlicht wird dies durch die Projektion des Aggregates auf die Oberfläche in Abbildung (a), deren Winkel α identisch zum Winkel des herabgefallenen Aggregates ist. Voraussetzung für diese Winkelerhaltung ist, daß das wirksame Magnetfeld nicht senkrecht zur Oberfläche des auffangenden Probenträgers anliegt, da in diesem Fall nicht vorhergesagt werden kann, in welcher Richtung sich das Aggregat ablageren wird. Alle angelegten Magnetfelder lagen parallel zur Oberfläche der Probenträger (vgl. Tabelle 6.3, Tabelle 6.4 und Abbildung 5.18)

Für die statistische Untersuchung der Ausrichtungswinkel der Aggregate wurden Bilder von Probenträgern ausgewählt, die unter kompensiertem Feld gewachsene Aggregate aufgefangen haben. Als Vergleichsgruppe wurden Bilder von Probenträgern ausgewählt, die unter einem Magnetfeld von $B_z \approx 50.000 \text{ nT}$ – also einem Feld quer zur Flugzeugachse (vgl. Kapitel 5.5.2) – gewachsene Aggregate aufgefangen haben. Für diese Aggregate wurde analog zur Auswertung der Ausrichtungswinkel der Aggregate, die während der ADAM-Kampagne unter rotierendem Erdmagnetfeld beobachtet wurden (vgl. Kapitel 4.3), eine Analyse der Abhängigkeit der Abweichung von Durchschnittsausrichtungswinkel von der Länge der Aggregate durchgeführt. Abbildung 6.10 zeigt jeweils diese Abweichung vom Durchschnittswinkel auf dem Bild über der Länge der Aggregate.

Man erkennt in Abbildung 6.10 oben, daß die Abweichungen der Aggregatausrichtung

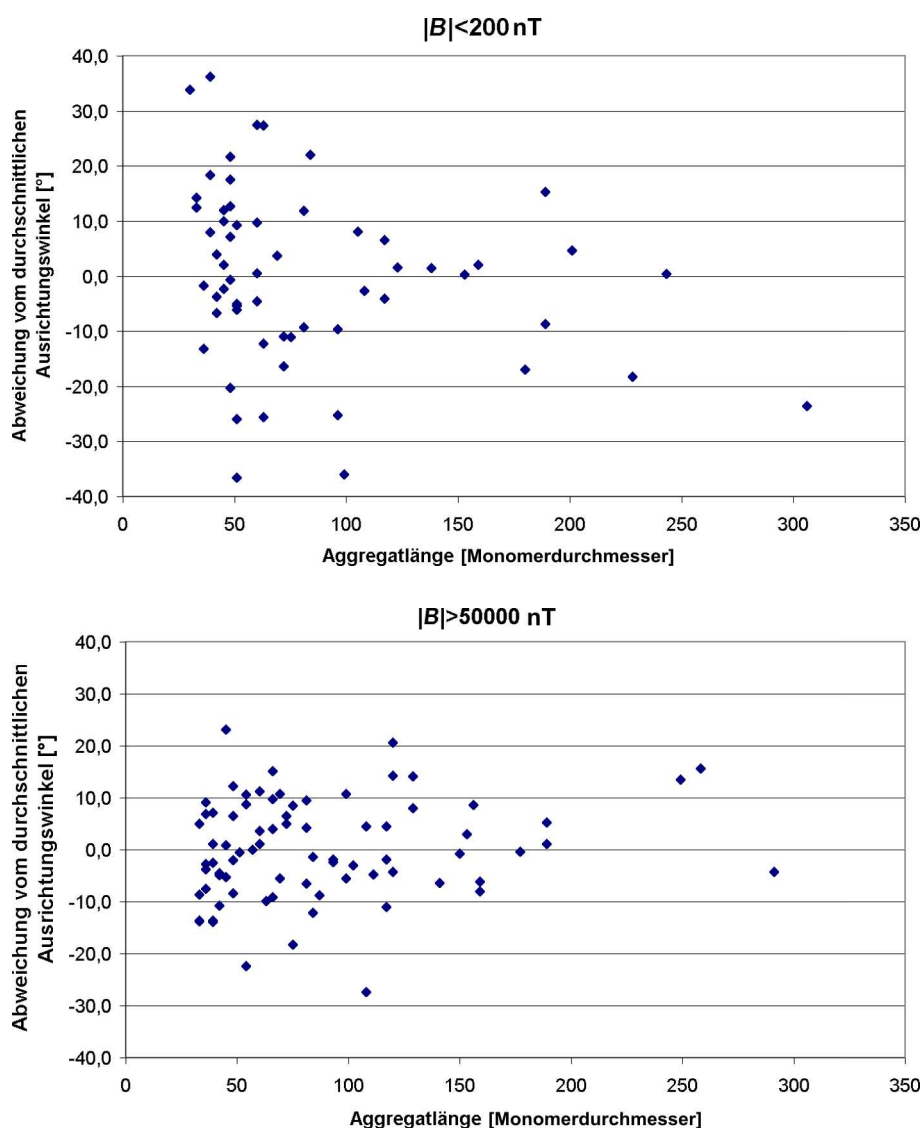


Abbildung 6.10: Ausrichtungswinkel von unter differierenden magnetischen Bedingungen gewachsenen Aggregaten in Abhängigkeit von ihren jeweiligen Längen. Die obere Abbildung zeigt das Verhältnis der Ausrichtung zur Länge von Aggregaten, die unter magnetisch kompensierten Bedingungen gewachsen sind, während die Aggregate, die für die untere Abbildung untersucht worden sind, unter einem konstanten Magnetfeld von etwa 50.000 nT gewachsen sind.

vom Durchschnittswinkel unter kompensierten Bedingungen deutlich mehr streut als die Abweichungen der unter konstantem Magnetfeld gewachsenen Aggregate in der unteren Abbildung. Die Winkel der ohne Magnetfeld gewachsenen Aggregate streuen zwischen -40° und $+40^\circ$, während sie bei Aggregaten, die unter einem konstantem Feld gewachsen sind, zwischen -30° und $+30^\circ$ liegen. Dies entspricht der Erwartung, daß die Aggregatausrichtung unter kompensierten Bedingungen geringer ist. Die Aggregate haben nicht die Möglichkeit sich an einem Führungsfeld auszurichten.

Abbildung 6.11 zeigt die Streuung der Ausrichtung der Aggregate um die Durchschnitts-

ausrichtung auf dem jeweiligen Bild unabhängig von der Aggregatlänge. Auch hier sind deutliche Unterschiede zwischen kompensiertem und konstantem Feld zu erkennen. Die Verteilung der unter kompensierten Bedingungen gewachsenen Aggregate ist insgesamt deutlich flacher als die Verteilung der unter einem Feld von etwa 50.000 nT gewachsenen Aggregate. Die rechte Verteilung bricht bei 30° ab, während die im magnetfeldfreien Raum gewachsenen Aggregate eine deutlich größere Variation der Ausrichtungswinkel von bis zu 40° aufweisen.

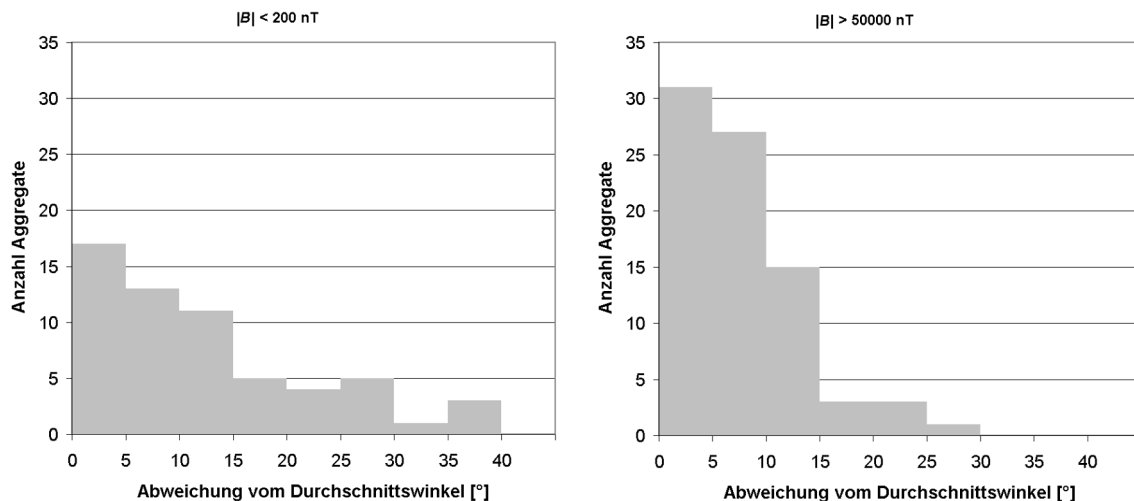


Abbildung 6.11: Verteilung der Ausrichtungswinkel von unter differierenden magnetischen Bedingungen gewachsenen Aggregaten.

Um den Effekt der Ausrichtung der Aggregate am Führungsfeld quantitativ abschätzen zu können, wurden Mittelwerte der Aggregatausrichtung aller Aggregate von der Durchschnittsausrichtung auf dem jeweiligen Bild ermittelt. Für die 60 unter magnetfeldfreien Bedingungen gewachsenen Aggregate ergibt sich mit $12,2^\circ \pm 9,9^\circ$ ein deutlich höherer Abweichungswert als für Aggregate, die unter konstantem Magnetfeld von etwa 50.000 nT gewachsen sind, für die $7,7^\circ \pm 5,6^\circ$ berechnet wurde.

Wie erwartet zeigen die Meßwerte, daß eine Ausrichtung der entstandenen Aggregate an einem anliegenden Führungsfeld durch die dynamische Kompensation der auftretenden Störfelder verhindert werden kann. Das Anlegen eines konstanten Magnetfeldes wiederum führt dazu, daß sich die Aggregate verstärkt an dem Feld ausrichten. Eine quantitative Untersuchung dieses Phänomens war leider aufgrund der durch die Parabelflüge begrenzten Anzahl der Experimente nicht möglich.

6.4 Größenverteilung der beobachteten Aggregate

Die bereits in Kapitel 6.3 untersuchten Aggregate ausgewählter SEM-Aufnahmen wurden in Bezug auf ihre Länge ausgewertet. Abbildung 6.12 zeigt die Verteilungen der Aggregatlänge bei verschwindendem äußeren Magnetfeld. Dabei ist zu beachten, daß sehr klei-

ne Aggregate unterhalb einer Grenze von etwa 30 Bildpunkten aufgrund ihrer Feinheit und der Unübersichtlichkeit von feinen Strukturen auf den Bildern nicht berücksichtigt worden sind. Die Grafiken beziehen sich also auf die Größenverteilung ab etwa 10 Partikeldurchmessern.

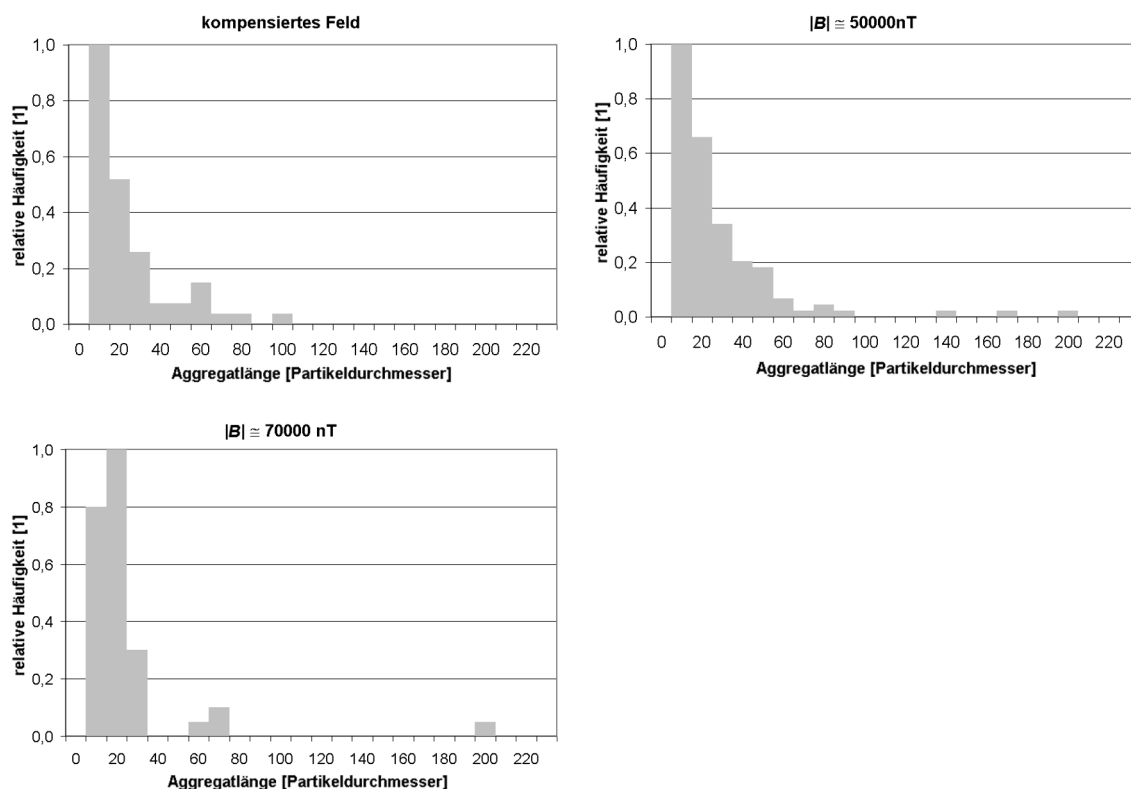


Abbildung 6.12: Längenverteilung der Aggregate aus CAIN+ABEL: Die Verteilungen sind jeweils normiert auf den höchsten Wert. Insgesamt wurden mehr als 220 Aggregate für die Verteilungen ausgewertet.

Dabei ist jeweils die relative Häufigkeit der Aggregatlängen über einer Klassenbreite von jeweils zehn Partikeldurchmessern aufgetragen. Man erkennt jeweils einen erheblichen Anteil von Aggregaten, die zwischen 10 und 30 Partikeldurchmesser lang sind. Die Häufung am unteren Ende der Skala läßt sich einfach durch die kurze Aggregationszeit von 20 Sekunden erklären (vgl. Kapitel 3.2).

Die Ähnlichkeit der Längenverteilung bei kompensiertem magnetischem Feld und bei einem Feldbetrag von 50.000 nT läßt darauf schließen, daß die Stärke des äußeren Feldes auf den Wachstumsprozeß der Aggregate hinsichtlich der Geschwindigkeit und damit der Länge wenig Einfluß hat. Einzig die Verteilung bei einem externen Feldbetrag von etwa 70.000 nT weist eine leichte Verschiebung zu etwas längeren Aggregaten auf, so daß eine Beeinflussung der Länge der entstandenen Aggregate durch noch höhere Magnetfelder nicht ausgeschlossen werden kann. Eine weitere Untersuchung dieses Zusammenhangs war aufgrund der technischen Beschränkungen der Magnetfeldgenerierung nicht möglich (vgl. Kapitel 5.3).

Zum Vergleich ist in Abbildung 6.13 die Längenverteilung der während der ADAM-Kampagne unter variablen Magnetfeldern gewonnenen Aggregate aufgetragen. Wie man deutlich erkennen kann, unterscheidet sich diese Verteilung signifikant von der Verteilung der Längen der Aggregate, die unter kontrollierten magnetischen Bedingungen gewachsen sind. Ein Großteil der Aggregate weist Längen von 30 bis 40 Partikeldurchmessern auf, während die Maxima der Längenverteilung der unter kontrollierten magnetischen Bedingungen gewachsenen Aggregate der ADAM+EVE- und der CAIN+ABEL-Kampagne etwa bei 10-20 Partikeldurchmessern liegen.

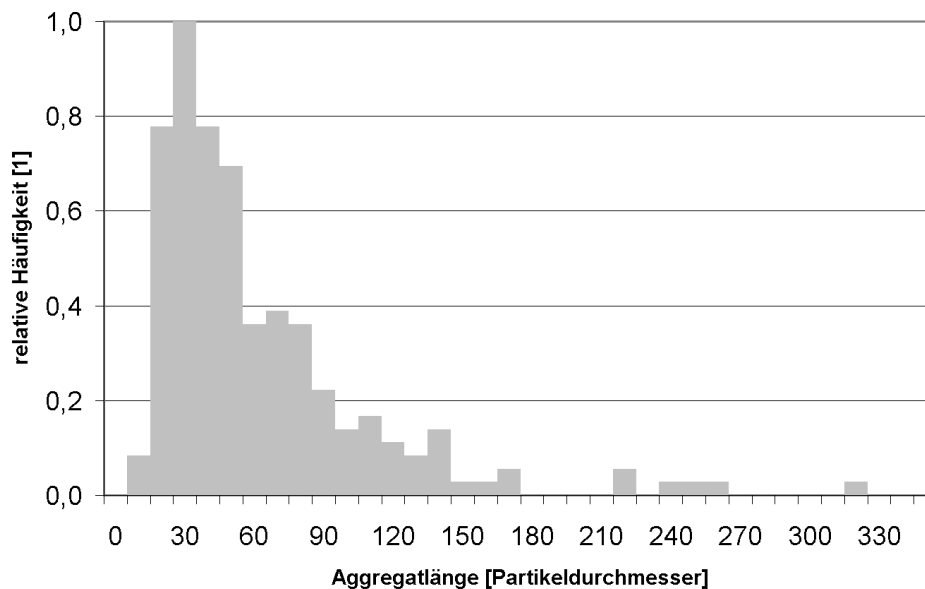


Abbildung 6.13: Längenverteilung der Aggregate, die während der ADAM-Kampagne auf den *in-situ*-Aufnahmen aufgenommen worden sind. Die Verteilung zeigt ihr Maximum etwa zwischen 30 und 40 Partikeldurchmessern.

Dies läßt darauf schließen, daß die stark variablen Felder während der unkompenzierten Flüge (vgl. Kapitel 4.5) das Längenwachstum der Aggregate dahingehend beeinflussen, daß diese durch die Schwankungen des Feldes in günstigere Lage zueinander gebracht werden.

Obwohl der Betrag des während der ADAM-Kampagne anliegenden Erdmagnetfeldes mit etwa 45.000 bis 50.000 nT in ähnlichen Bereichen lag, wie die Felder, die während der CAIN+ABEL-Kampagne angelegt wurden, sind dennoch deutliche Unterschiede in den Verteilungen zu erkennen. Diese müssen also durch die Variation des Magnetfeldes im Experimentierraum durch die parabelförmige Trajektorie des Flugzeugs (vgl. Kapitel 4.5 und 3.2) hervorgerufen worden sein.

Dieses Phänomen basiert darauf, daß unter dem rotierenden Magnetfeld unter unkompenzierten Bedingungen die Aggregate während der Rotation des Feldes wesentlich häufiger in Pol-zu-Pol-Lage geraten, als bei kompenziertem oder konstantem Feld. In Pol-zu-Pol-

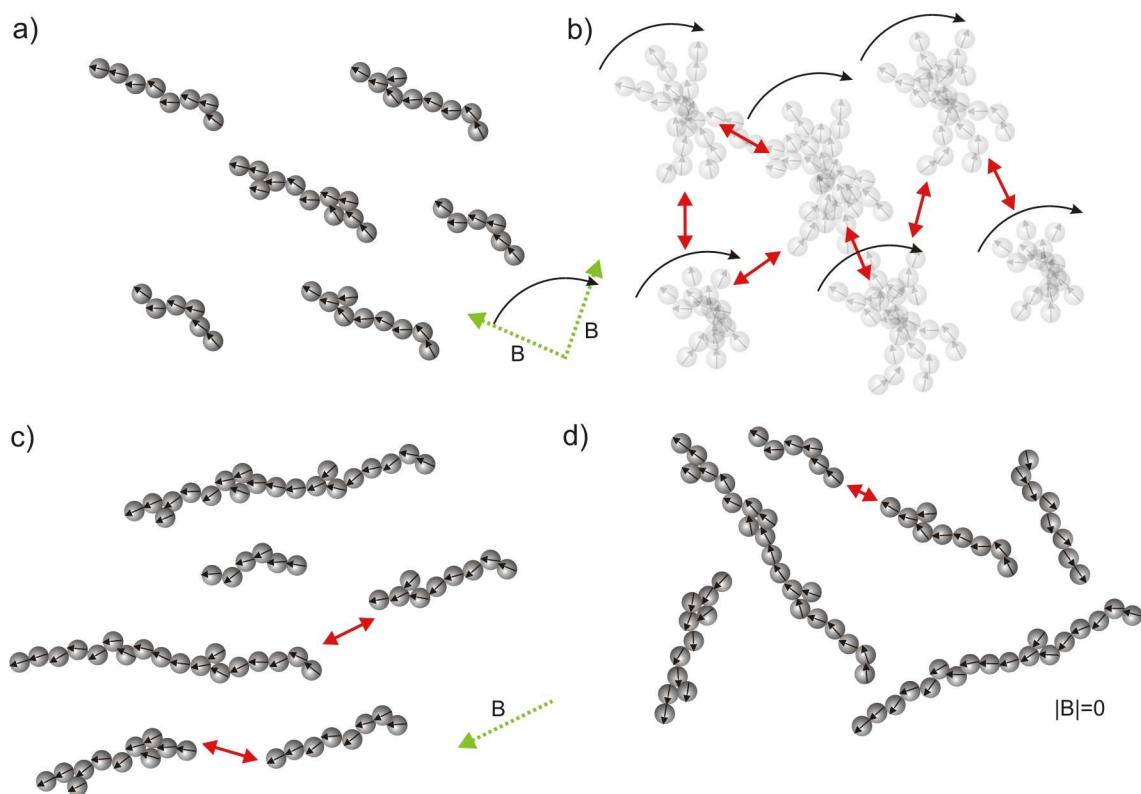


Abbildung 6.14: Schematische Ausrichtung von Aggregaten unter verschiedenen magnetischen Bedingungen. Die roten Pfeile kennzeichnen geometrisch direkte Pol-zu-Pol-Anordnungen von Aggregaten. Grüne, gestrichelte Pfeile die Richtung des momentan vorherrschenden Magnetfeldes. Abbildungen a) und b) zeigen die Situation im rotierenden Erdmagnetfeld, die einzelnen Aggregate rotieren mit dem Magnetfeld und befinden sich wesentlich häufiger in Pol-zu-Pol-Lagen als bei konstantem Magnetfeld (c). Bei kompensiertem Feld (d) stellen sich Pol-zu-Pol-Lagen nur zufällig ein und sind daher ebenfalls seltener.

Lage sind die Aggregate aufgrund der dann zwischen ihnen verstärkt wirkenden magnetischen Kräfte eher in der Lage, sich aneinander zu lagern. Die Abbildungen 6.14 (a) und (b) verdeutlichen diese Situation. Im Gegensatz dazu sind unter konstantem Magnetfeld (c) oder unter kompensierten Bedingungen (d) Pol-zu-Pol-Lagen der Aggregate wesentlich seltener. Entweder weil die Richtung des Magnetfeldes konstant ist und daraus eine starre parallele Ausrichtung der Aggregate resultiert, oder weil gar keine einheitliche Ausrichtung der Aggregate besteht. Seltener Pol-zu-Pol-Lagen der Aggregate führen zu schwächeren Anziehungskräften der Aggregate untereinander und damit zu einer erhöhten Anlagerungszeit. Daher wachsen Aggregate unter konstantem Magnetfeld langsamer.

6.5 Struktur der beobachteten Aggregate

Die Analyse der räumlichen Anordnung der Einzelpartikel innerhalb der erzeugten Aggregate erfolgte mit dem Computerprogramm *FRACTALYSIS*, das von Nübold (2001) entwickelt wurde, um Bilder von Aggregaten automatisiert einer Strukturanalyse zu unterziehen. Das Programm wertet leicht modifizierte Bilder von Aggregaten sowohl der *in-situ*-Aufnahmen, die dunkle Aggregate auf hellem Grund zeigen, als auch der Bilder des SEM, die helle Aggregate auf dunklem Grund zeigen, aus. Die Bilder wurden dazu wie folgt bearbeitet: Die zu untersuchenden Strukturen wurden zunächst aus dem Ursprungsbild ausgeschnitten und störende Teile anderer Aggregate oder Einzelpartikel, die sich noch auf der Abbildung befanden, entfernt. Danach wird durch eine Korrektur des Schwarz- und des Weißpunktes des Bildes das Aggregat mehr hervorgehoben und der Hintergrund des Bildes bei SEM-Aufnahmen abgedunkelt, bei *in-situ*-Aufnahmen aufgehellt. Abbildung 6.15 verdeutlicht das Verfahren.

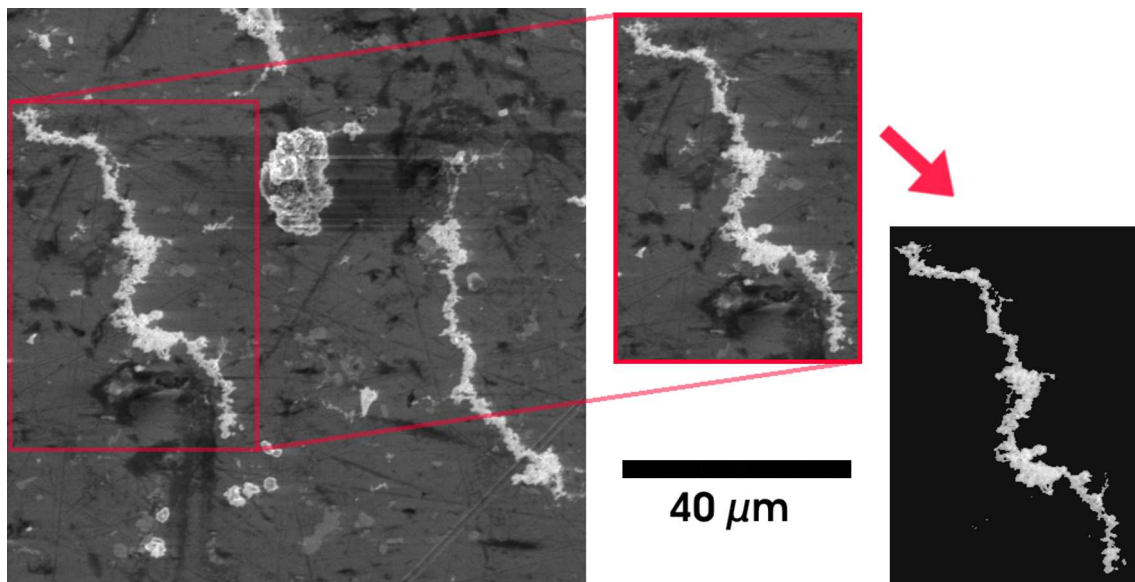


Abbildung 6.15: Strukturanalyse von Aggregaten: Das ausgeschnittene Bild wird zur Analyse mit *FRACTALYSIS* nachbearbeitet, um das abgebildete Aggregat freizustellen.

Das Programm *FRACTALYSIS* modelliert nach Angabe von Parametern, wie zum Beispiel der Bildbreite und der Partikelgröße, das jeweilige Aggregat aus dem bearbeiteten Bildausschnitt. In Abbildung 6.16 ist ein solches modelliertes Aggregat zu erkennen. Aus dem modellierten Aggregat ermittelt das Programm dann die effektive fraktale Dimension D_{eff} . Da es sich bei den Bildern der Aggregate um eine Projektion der Aggregate auf die Bildebene handelt, muß diese effektive fraktale Dimension noch korrigiert werden, um einen Wert für die reale fraktale Dimension D_f zu erhalten. Das genaue Verfahren wurde von Farestam und Niklasson (1989) entwickelt und wird von *FRACTALYSIS* halbautomatisch auf das Aggregat angewendet. Eine nähere Beschreibung des Programms und seiner Funktionsweise finden sich in Nübold (2001).

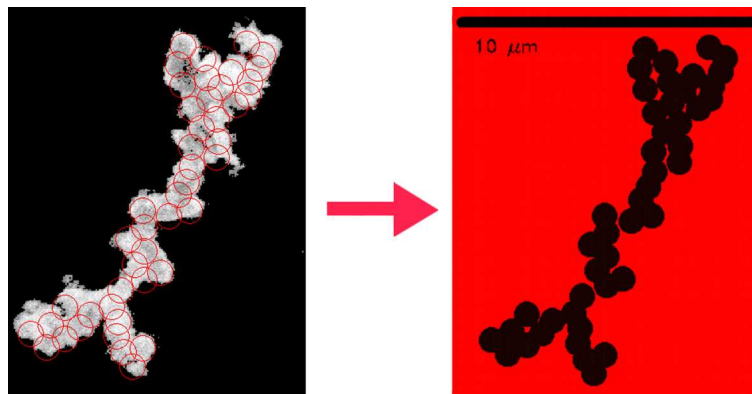


Abbildung 6.16: Modelliertes Aggregat: Ausgehend vom modifizierten Bild des Aggregates und von Parametern wie der Partikelgröße und der Bildbreite sowie eines Toleranzwertes für Schwarzweißübergänge und eines Überlappungswertes modelliert *FRACTALYSIS* ein Aggregat, das danach vom Programm analysiert werden kann.

Für die statistische Auswertung wurden etwa 150 Aggregate aus den SEM-Bildern der ADAM+EVE- und der CAIN+ABEL-Kampagnen auf die obengenannte Weise extrahiert und analysiert. Dabei war zu beachten, daß *FRACTALYSIS* für die Modellierung von sehr kurzen Aggregaten $r_a < 15 \mu\text{m}$ nicht geeignet ist, so daß nur Aggregate mit einer Länge über diesem Grenzwert analysiert wurden. Es wurden dabei größtenteils die selben Aggregate untersucht, die bei der Analyse der Aggregatlänge in Kapitel 6.4 vermessen wurden. Abbildung 6.17 zeigt die Verteilung der fraktalen Dimensionen von unter verschiedenen magnetischen Bedingungen gewachsenen Aggregaten. Beide Verteilungen sind auf den Maximalwert der größten Klasse normiert, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Sowohl bei den unter feldfreien Bedingungen entstandenen Aggregaten (in der Abbildung das obere Bild), als auch bei den unter konstantem Feld gewachsenen Aggregaten (in der Abbildung unten) liegt das Maximum der Verteilung bei sehr niedrigen fraktalen Dimensionen um 1,0.

Die Verteilungen zeigen kaum signifikante Unterschiede. Die Verteilung der fraktalen Dimension der unter kompensierten Feldbedingungen gewachsenen Aggregate ist etwas steiler als die der Aggregate, die unter konstantem Magnetfeld entstanden sind. Die Verteilung der unter konstantem Feld gewachsenen Aggregate fällt etwas flacher ab, es wurden einige wenige Aggregate mit einer höheren fraktalen Dimension von 1,30 bis 1,45 gefunden. Als durchschnittliche Werte ergeben sich für unter kompensierten Bedingungen entstandene Aggregate $D_f = 1,09 \pm 0,08$ und für Aggregate, die unter konstantem Feld gewachsen sind, $D_f = 1,11 \pm 0,11$. Die fraktale Dimension der magnetfeldfrei entstandenen Aggregate liegt also unterhalb der von Aggregaten, die unter Feldeinfluß entstanden sind. Dies spiegeln auch die Werte wider, die Nübold (2001) bei Untersuchungen von Aggregaten, die in rotierenden Magnetfeldern gewachsen sind, gefunden hat. Die Werte von Nübold (2001) für die fraktale Dimension unter rotierendem Feld entstandener Aggregate liegen mit 1,16 noch oberhalb der Werte, die in dieser Arbeit für unter konstantem Feld gewachsene Aggregate gefunden wurden. Dieses Phänomen läßt sich nun analog zum Längenwachstum (vgl. Kapitel 6.4) erklären: Im Fall des rotierenden Magnetfeldes

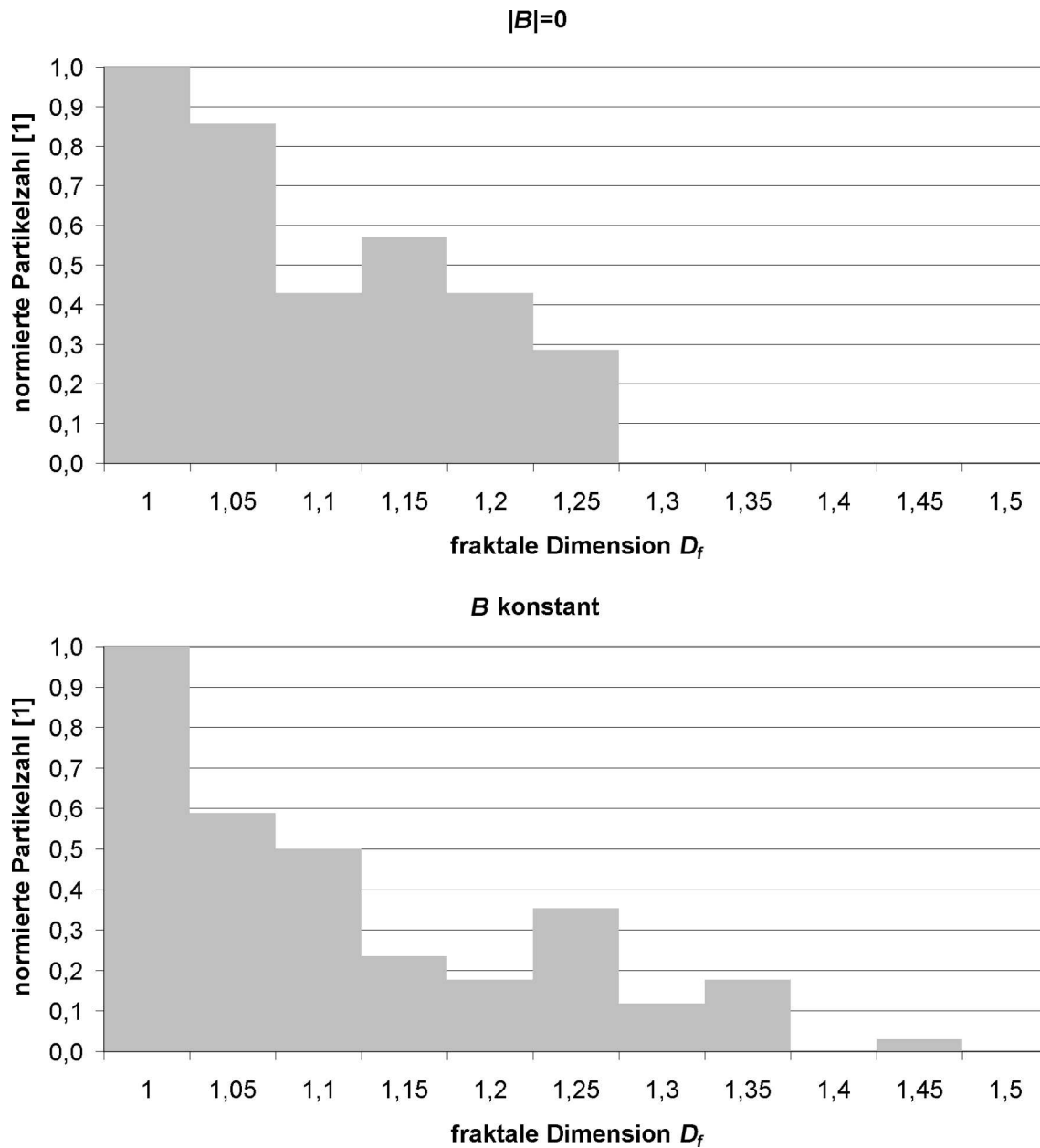


Abbildung 6.17: Verteilung der fraktalen Dimension der gewachsenen Aggregate: Die obere Abbildung zeigt die Verteilung der fraktalen Dimensionen D_f von Aggregaten, die unter nahezu feldfreien Bedingungen gewachsen sind. Die untere Abbildung zeigt die Verteilung der fraktalen Dimension von Aggregaten, die unter konstanten Feldbedingungen entstanden sind. Die Verteilungen wurden jeweils auf den Maximalwert der größten Klasse normiert.

befinden sich die einzelnen Aggregate viel häufiger in Positionen mit unterschiedlichen Winkeln zueinander, da sie aufgrund ihrer differierenden Trägheitsmomente verschieden schnell rotieren. Dadurch ergeben sich häufiger Möglichkeiten sich nicht linear zu verbinden. Dies führt dazu, daß verzweigtere Aggregate entstehen können. Liegt kein äußeres Feld an, so können sich die Aggregate während des Wachstumsvorgangs ohne führendes

Feld frei drehen. In diesem Fall steht einer Rotation in Pol-zu-Pol-Lage nur die Trägheit des Aggregates, aber kein Führungsfeld entgegen. Daher lagern die Aggregate sich eher in Pol-zu-Pol-Lage an und bilden damit Strukturen von niedrigerer fraktaler Dimension.

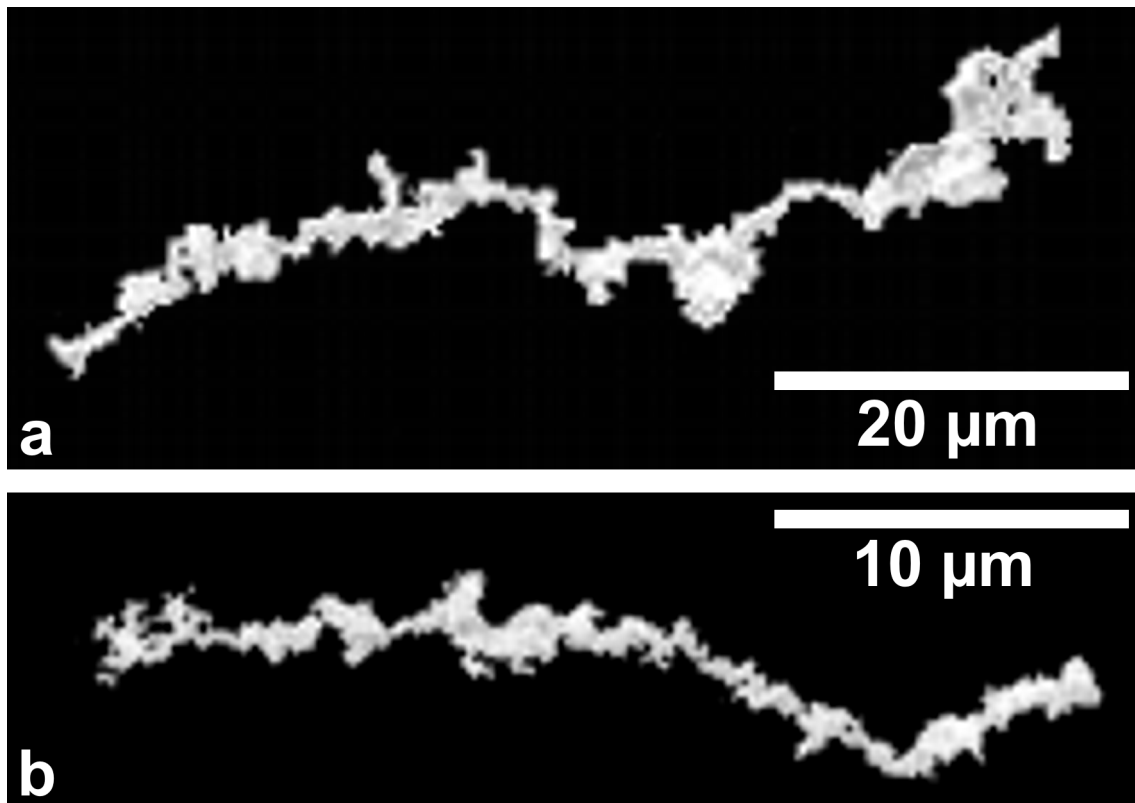


Abbildung 6.18: Unter kompensierten Bedingungen gewachsene Beispielaggregate: Beide Aggregate stammen aus der zweiten Parabel des ersten Fluges der CAIN+ABEL-Kampagne.

Visuell unterscheiden sich die Aggregate, die unter verschiedenen magnetischen Bedingungen gewachsen sind, teilweise deutlicher als bei Betrachtung der Verteilung der fraktalen Dimensionen. Dies liegt daran, daß in die Statistik viele relativ kurze der unter konstantem Feld gewachsenen Aggregate eingeflossen sind. Diese scheinen im Unterschied zu den längeren unter konstantem Feld entstandenen Aggregaten fraktale Dimensionen zu haben, die vergleichbar sind mit denen der Aggregate, die unter feldfreien Bedingungen gewachsen sind. Aufgrund der Kürze der Aggregationszeit und der Ausrichtungsmechanismen (vgl. Kapitel 6.4) dominiert der Anteil dieser kürzeren Aggregate im untersuchten Ensemble. Dagegen enthüllt die visuelle Sichtung teilweise deutliche Strukturunterschiede. Die folgenden beiden Abbildungen 6.18 und 6.19 zeigen einige ausgewählte Beispielaggregate, die jeweils unter unterschiedlichen magnetischen Bedingungen entstanden sind.

In Abbildung 6.18 sind zwei typische Aggregate zu erkennen, die unter magnetfeldfreien Bedingungen entstanden sind. Beide Aggregate haben eine vorwiegend lineare Struktur, das obere Aggregat (a) ist dabei etwa 50 µm lang. Die Länge des unteren Aggregates (b)

beträgt etwa $30\ \mu\text{m}$. Beide wurden aus einem Bild extrahiert, das von der Oberfläche eines Probenträgers aufgenommen wurde, der während der zweiten Parabel des ersten Fluges der CAIN+ABEL-Kampagne Aggregate auffing. Die fraktale Dimension des Aggregates (a) wurde zu 1,10 bestimmt, womit es etwas weniger linear ist als das Aggregat (b), dessen fraktale Dimension zu 1,05 ermittelt wurde. Die fraktale Dimension des größten Teils der unter feldfreien Bedingungen gewachsenen Aggregate liegt in diesem Bereich.

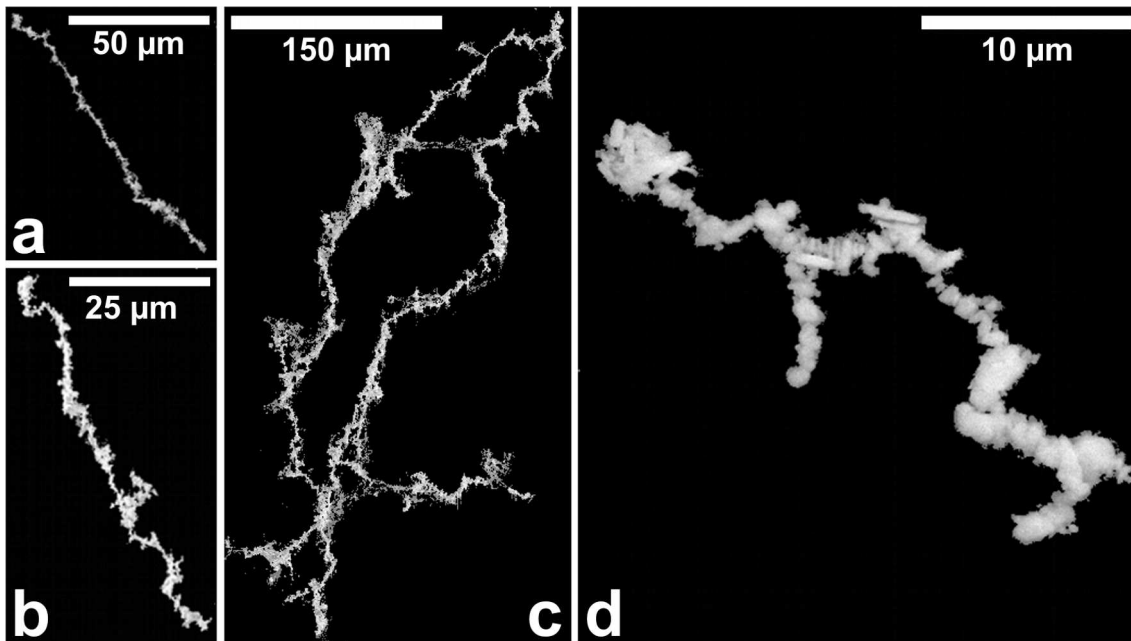


Abbildung 6.19: Unter konstantem Feld gewachsene Beispielaggregate: Die Aggregate (a) und (d) entstammen der siebenten Parabel des ersten Fluges, die Aggregate (b) und (c) der fünften Parabel der CAIN+ABEL-Kampagne. Aggregate (a) und (d) wuchsen unter einem Magnetfeld von $70.000\ \text{nT}$ in z-Achse des Spulensystems, die Aggregate (b) und (c) unter $50.000\ \text{nT}$ in identischer Richtung.

Teilweise deutlich von den linearen Strukturen der unter kompensierten Feldern gewachsenen Aggregate unterscheiden sich die Aggregate der Abbildung 6.19, die bei konstanten Feldern entstanden sind. Das Aggregat (a) weist mit einer fraktalen Dimension von 1 noch deutlich lineare Strukturen ähnlich der Aggregate in Abbildung 6.18 auf. Mit einer Länge von über $60\ \mu\text{m}$ ist es eines der längsten der unter Führungsfeld gewachsenen Aggregate mit einer fraktalen Dimension nahe 1. Das Aggregat (b) zeigt mit einer fraktalen Dimension von 1,1 weniger Linearität, ist aber mit über $50\ \mu\text{m}$ von ähnlichen Ausmaßen wie das Aggregat (a). Ein Teil der unter konstantem Feld gewachsenen Aggregate zeigt jedoch deutlich komplexere Strukturen auf, wie die Aggregate (c) und (d) verdeutlichen. Derart strukturierte Aggregate waren unter den im feldfreien Raum gewachsenen Aggregaten nicht zu finden. Die fraktale Dimension des Aggregates (c) wurde zu 1,35 ermittelt, während die Modellierung des Aggregates (d) 1,25 lieferte. Diese Werte liegen deutlich über den für die linearen Aggregate ermittelten und spiegeln somit die komplexere Struktur wider. Mit einer Länge von über $300\ \mu\text{m}$ und einer Breite von deutlich über $100\ \mu\text{m}$ hat es eine flächigere Struktur. Viele der gefundenen Aggregate sind von den Ausmaßen

allerdings kleiner, wie das Aggregat (d) mit etwa $40 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$.

Die genauere Betrachtung einzelner Aggregate fördert einzelne strukturelle Merkmale zu Tage, die sich häufig wiederholen. Bereits Nübold (2001) hatte bei der Analyse von Bariumferrit-Aggregaten diese Merkmale beschrieben. Abbildung 6.20 zeigt ein einzelnes Aggregat, das viele dieser strukturellen Merkmale aufweist. Das Aggregat ist unter einem konstanten Magnetfeld von 70.000 nT auf der z-Achse des Spulensystems gewachsen. Mit 1,45 weist es die höchste ermittelte fraktale Dimension von allen untersuchten Aggregaten auf. Seine Länge ist mit etwa $50 \mu\text{m}$ eher durchschnittlich, mit einer Breite von $30 \mu\text{m}$ gehört es jedoch zu den deutlich flächigen Aggregaten.

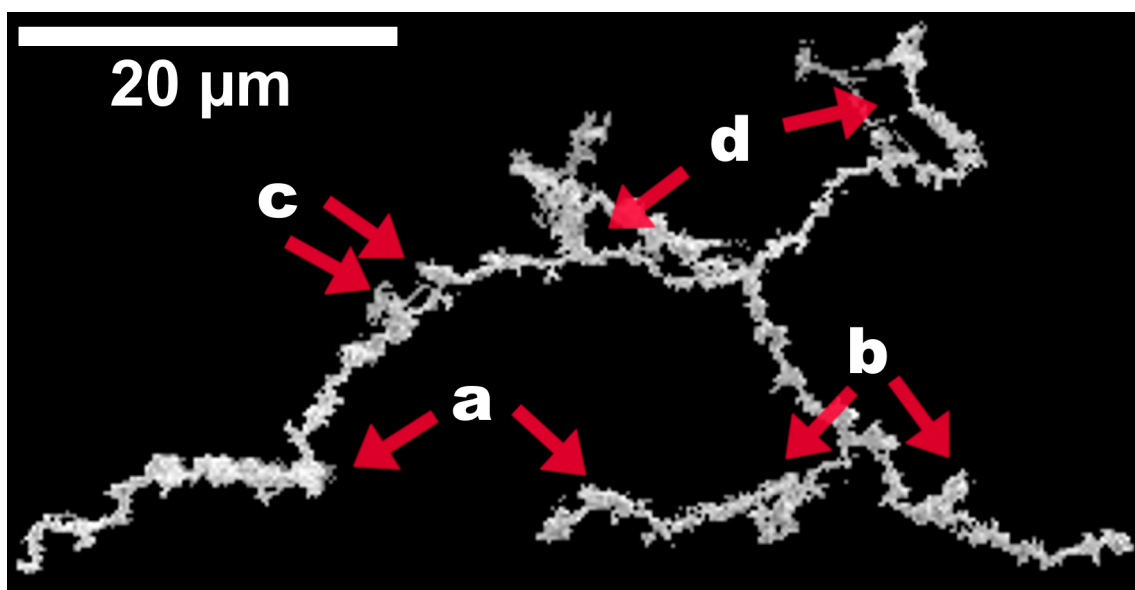


Abbildung 6.20: Beispiel für Aggregatstrukturen: Das Aggregat wuchs unter einem Magnetfeldbetrag von 70.000 nT und entstammt der fünften Parabel des zweiten Fluges des CAIN+ABEL-Kampagne. Die mit a-d bezeichneten Bereiche des Aggregates weisen strukturelle Merkmale auf, die in vielen Aggregaten wiederzufinden sind (siehe Text).

In der Abbildung treten einige der angesprochenen strukturellen Merkmale deutlich zu Tage: Man erkennt Bögen und Knicke, die mehr oder weniger lineare Unterabschnitte des Aggregates verbinden (a). Es treten Abzweigungen innerhalb des Aggregates mit „toten Enden“ auf (b). Man erkennt an einigen Stellen Anlagerungen von einzelnen Partikeln oder Partikelgruppen, die aus dem Aggregat herausstehen (c). Deutlich im Bild zu erkennen sind zwei ringförmige Strukturen, die teilweise in das Aggregat eingebettet, teilweise am Rand des Aggregates angelagert sind (d). Diese beschriebenen Merkmale hat Nübold (2001) sowohl in experimentell gewachsenen als auch in per Computermodell simulierten Aggregaten entdeckt. Daß sich diese strukturellen Merkmale in den unter unterschiedlichen magnetischen Bedingungen gewachsenen Aggregaten wiederfinden, spricht dafür, daß sich die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der Aggregation unter verschiedenen magnetischen Bedingungen vergleichen lassen. Dafür spricht auch, daß die Simulationsergebnisse für die Aggregation magnetischer Partikel unter externen Magnetfeldern

von Nübold (2001) ebenfalls relativ niedrige fraktale Dimensionen von 1,0 bis 1,1 liefern.

Somit scheinen sich die unter unterschiedlichen Magnetfeldern gewachsenen Aggregate hinsichtlich ihrer Struktur nur geringfügig zu unterscheiden, einzig die im feldfreien Raum entstandenen Aggregate weisen eine linearere Struktur auf. Das spricht dafür, daß in diesem Fall die Kräfte zwischen den einzelnen magnetischen Partikeln mehr zum Tragen kommen und die Aggregate deshalb während ihres Wachstums häufiger eine Pol-zu-Pol-Lage erreichen können.

6.6 Diskussion der Ergebnisse

6.6.1 Magnetfeldmanipulation

Wie bereits in Kapitel 6.1 erwähnt, gelang es während der ADAM+EVE-Kampagne das im Versuchsraum rotierende Erdmagnetfeld samt anderer Störfelder größtenteils zu kompensieren. Damit war die Voraussetzung gegeben, um unter kontrollierten Feldbedingungen Experimente durchzuführen. Das Erdmagnetfeld konnte auf Werte unter 250 nT kompensiert werden, was deutlich unter dem Betrag des Erdfeldes im Versuchsgebiete von etwa 46.000 nT liegt. Die angestrebten 5 nT (vgl. Kapitel 4.4.1) ließen sich aus technischen Gründen nicht verwirklichen. Dies lag teilweise an der Trägheit des Kompensationsystems, teilweise an der Positionierung von Magnetometer und Kammer (vgl. Kapitel 6.1).

Die Weiterentwicklung des Systems von der reinen Kompensation zur Erzeugung eines konstanten Magnetfeldes verbesserte die Leistung noch einmal, so daß während der CAIN+ABEL-Kampagne das kompensierte Feld auf unter 50 nT reduziert beziehungsweise das konstante Feld auf ± 50 nT gehalten werden konnte (siehe Kapitel 6.2). Diese Werte liegen im Bereich von einem Promille des Erdmagnetfeldes und deutlich unter einem Promille der erzeugten Felder.

Es ist also gelungen, ein System zu entwickeln, das das Magnetfeld im Versuchsraum an Bord eines Parabelflugzeugs während des Durchfluges einer Parabel derart beeinflussen kann, daß Experimente unter kontrollierten Magnetfeldbedingungen durchgeführt werden können. Dabei liegen die erzielten Magnetfeldwerte in Bereichen, in denen man die erzeugten magnetischen Bedingungen als „nahezu kompensiert“ beziehungsweise als „konstant“ ansehen kann. Das System hat allerdings – technisch durch die Parameter des Spulensystems und durch die verwendete Elektronik bedingt – einen Maximalwert des erzeugbaren Feldes von etwa 100.000 nT. Dieser Wert liegt an der unteren Grenze des Bereichs, der für Magnetfelder im jungen Sonnensystem mit 100.000 bis 700.000 nT angenommen wird (vgl. Kapitel 2.3). Hier wäre ein höherer Wert wünschenswert gewesen, der sich aber aufgrund von Begrenzungen der verwendeten Magnetometer, des Spulensystems und der Stromversorgung nicht verwirklichen ließ. Dennoch lassen sich die Effekte, die externe Magnetfelder auf die Aggregation von magnetischen Mikrometerpartikeln haben, mit diesem System studieren. Einzig quantitative Aussagen zu den Auswirkungen

der Stärke von externen Feldern auf den Aggregationsprozeß lassen sich aufgrund der technischen Unzulänglichkeit des Systems schwer machen.

6.6.2 Aggregateigenschaften

Die gefundenen Werte für Ausrichtung, Länge und Struktur der beobachteten Aggregate zeigen teilweise eine Abhängigkeit von den magnetischen Umgebungsbedingungen während der Entstehungsphase. Tabelle 6.5 stellt die Werte für verschiedene Magnetfelder gegenüber.

Die Koppelung der entstandenen Aggregate an ein führendes Magnetfeld – sei es nun das Magnetfeld der Erde samt Verzerrungen desselben durch den Flugzeugkörper und Störungen durch die Flugzeugelektrik sowie andere Experimente oder ein konstant angelegter Magnetfeldoffset – zeigt wie erwartet ihre Wirkung deutlich an der Ausrichtung der beobachteten Aggregate: Am besten am Führungsfeld ausgerichtet, also mit der kleinsten Abweichung der Ausrichtung der Aggregate untereinander, sind die Aggregate, die in einem unkontrolliert rotierenden Magnetfeld, das beim Durchfliegen des Erdmagnetfeldes auf einer Parabelbahn im Experimentierraum anliegt, gewachsen sind. Da das Führungsfeld während der Relaxationszeit der Aggregate (vgl. Kapitel 4.4.1) rotiert, ist die Ausrichtung der Aggregate nicht nur durch ihre Eigenrotation, die durch ihre Trägheit behindert wird, sondern auch durch die Rotation des Magnetfeldes auf die derzeitige Aggregatrichtung möglich. Die eigene Rotation der Aggregate in die Feldrichtung und die Rotation des Magnetfeldes selber können bei geeigneter geometrischer Konfiguration zu einer Verstärkung des Ausrichtungseffektes gegenüber einem konstanten Feld führen. Dies führt dazu, daß unter rotierendem Feld mit einer geringeren durchschnittlichen Abweichung der Aggregatausrichtung eine deutliche höhere Führungsfunktion des Feldes beobachtet wurde als unter konstantem Magnetfeld oder unter feldfreien Bedingungen.

	Abweichungswinkel [°]	Aggregatlänge [Monomerdurchmesser]	fraktale Dimension [1]
rotierend	$4,6 \pm 4,7$	66 ± 48	$1,16 \pm 0,05^*$
konstant	$7,7 \pm 5,6$	34 ± 33	$1,11 \pm 0,11$
kompensiert	$12,2 \pm 9,9$	28 ± 20	$1,09 \pm 0,08$

Tabelle 6.5: Eigenschaften der gewachsenen Aggregate: *Der Wert für die fraktale Dimension von unter rotierenden Magnetfeldern gewachsenen Aggregaten stammt von Nübold (2001).

Unter konstantem Magnetfeld wachsende Aggregate zeigen daher mit knapp 8° durchschnittlicher Abweichung der Aggregate vom Ausrichtungswinkel eine höhere Varianz. Dennoch liegt diese, wie erwartet, deutlich unter der Abweichung der Ausrichtung der Aggregate von der Durchschnittsrichtung für von unter kompensiertem magnetischen Feld gewachsener Aggregate, die mit über 12° die höchste beobachtete ist. Auch die maximale gefundene Abweichung von der durchschnittlichen Ausrichtung liegt mit 36,6° bei Aggregaten, die unter feldfreien Bedingungen entstanden sind, deutlich über der maxima-

len Abweichung von unter konstantem Feld gewachsenen Aggregaten, die zu $27,4^\circ$ ermittelt wurde. Liegt kein Führungsfeld an, so haben die Aggregate die Möglichkeit frei zu rotieren. Dennoch sind unter feldfreien Bedingungen Ausrichtungseffekte zu beobachten. Die geometrisch maximal mögliche Abweichung der Ausrichtung einer näherungsweise linearen Struktur von einer Vorzugsrichtung beträgt 90° , somit scheint eine Abweichung von 12° eher gering zu sein. Es existieren jedoch aufgrund ihres Dipolcharakters Kräfte zwischen den einzelnen Aggregaten (vgl. Kapitel 4.4.2), so daß in gewissem Maße eine einheitliche Ausrichtung der Aggregate untereinander stattfindet. Dies führt dazu, daß die Verteilung von Ausrichtungswinkeln der Aggregate, die unter magnetfeldfreien Bedingungen wachsen, nicht gleichmäßig ist.

Es hat sich gezeigt, daß die äußeren magnetischen Bedingungen einen signifikanten Einfluß auf die Ausrichtung der Aggregate während der Experimente haben. Insbesondere mit den Hinweisen auf die Ausrichtung von interstellaren Staubpartikeln an magnetischen Hintergrundfeldern und der daraus resultierenden Polarisation des Sternenlichtes (vgl. Kapitel 2.3.4) und den teilweise hohen Magnetfeldern im Einflußbereich junger Sterne (vgl. Kapitel 2.3.2) ist diese Erkenntnis von Bedeutung. Teilweise sind diese Felder jedoch deutlich höher als die, die mit dem für die Experimente verwendeten Versuchsaufbau technisch umzusetzen waren. Inwiefern der quantitative Einfluß der Stärke der Führungsfelder die Ausrichtung noch verstärken würde, ließ sich deshalb im Zuge der Experimente nicht weiter klären. Hierzu wären weitere Versuchsreihen notwendig. Es müßte eine deutlich höhere Anzahl von Experimenten unter verschiedenen magnetischen Konditionen durchgeführt werden, um die Auswertung auf eine breitere statistische Basis zu stellen. Aufgrund der Kürze der Versuchszeit (vgl. Kapitel 3.2) ist nicht anzunehmen, daß die Ausrichtungseffekte mit dem Ende der Schwerelosigkeitsphase und damit der Experimentierphase abgeschlossen wären. Bei verlängerter Versuchsdauer wäre zu erwarten, daß sich die Ausrichtungseffekte noch verstärken und auch bei sehr kleinen führenden Magnetfeldern die Ausrichtung nach einem gewissen Zeitraum deutlich perfekter ausfallen würde.

Die Länge der bei unterschiedlich starken, konstanten Magnetfeldern gewachsenen Aggregate unterscheidet sich nicht wesentlich. Wie angenommen wird das Wachstum von Aggregaten aus magnetischen Partikeln durch Führungsfelder begünstigt (siehe Kapitel 6.4). Dabei überwiegt der Einfluß eines auf kurzen Zeitskalen rotierenden Magnetfeldes gegenüber einem statischen Feld, wie die ermittelten Werte in Tabelle 6.5 verdeutlichen. Die durchschnittliche Länge der unter rotierendem Magnetfeld gewachsenen Aggregate übersteigt die Länge der Aggregate, die unter konstantem oder völlig ohne Führungsfeld gewachsen sind, um fast das Doppelte. Die Längen der unter nicht rotierenden Feldern gewachsenen Aggregate liegen mit 34 beziehungsweise 28 Monomerdurchmessern deutlich näher beieinander. Dies läßt darauf schließen, daß die Rotation des Feldes über den in Kapitel 6.4 bereits beschriebenen Mechanismus einen erheblichen Einfluß auf das Wachstum der Aggregate hat.

Im Vergleich mit den Zeitskalen, auf denen sich die Entwicklung von Sonnen- und Sternensystemen abspielte (vgl. Kapitel 2.1), sind die hier gefundenen Unterschiede in der Länge wenig signifikant. Diese Zeiträume sind um mehrere Größenordnungen länger, so

daß die Unterschiede im Längenwachstum auf kurzen Zeitskalen unter differierenden magnetischen Bedingungen wenig zum Tragen kommen werden.

Die Struktur der gefundenen Aggregate ähnelt in großem Maße den von Nübold (2001) experimentell und durch Modellierung gefundenen Strukturen. Strukturelle Merkmale wie Ringstrukturen, Bögen und Knicke finden sich in den unter verschiedenen Feldbedingungen gewachsenen Aggregaten ebenso wie in den von Nübold (2001) modellierten Aggregaten (vgl. Kapitel 6.5). Viele der gefundenen Aggregate weisen netzartige Strukturen auf oder sind aus mehreren einzelnen, nicht linear angeordneten Unteraggregaten aufgebaut. Einzig Aggregate, die komplett ohne Führungsfeld entstanden sind, weisen deutlich weniger komplexe Strukturen auf, sie sind meist komplett linear. Bei den Experimenten ohne Führungsfeld wurden praktisch keine netzartigen oder aus Einzelabschnitten kombinierte Aggregate gefunden.

Die fraktalen Dimensionen der Aggregate unterscheiden sich nur wenig. Abbildung 6.21 stellt die Werte der fraktalen Dimensionen von Aggregaten, die unter verschiedenen magnetischen Bedingungen und aus unterschiedlichen Partikelarten entstanden sind, gegenüber. Dabei werden die hier ermittelten Werte für unter konstanten und feldfreien Bedingungen gewachsene Aggregate denen von Nübold (2001) für unter rotierenden Bedingungen und für im Labor entstandenen sowie denen von Blum et al. (2000) im Mikrogravitationsexperiment CODAG für unmagnetisches SiO_2 gefundenen gegenübergestellt.

Die im Labor erzeugten Aggregate wurden von Nübold (2001) mit Hilfe der in Kapitel 3.2 beschriebenen Levitationstrommel erzeugt. Die dabei durchgeführten Experimente fanden im Erdmagnetfeld statt. Somit wurden sie unter konstanten Feldbedingungen durchgeführt, da die Kammer zwar rotiert, aber die wachsenden Aggregate ihre Position relativ zur Feldrichtung halten. Der signifikante Unterschied der fraktalen Dimension dieser in der Levitationstrommel gewachsenen Aggregate von 1,2 zu dem hier für im konstanten Feld entstandenen Aggregaten gefundenen Wert von 1,11 basiert auf der Funktionsweise der Levitationstrommel, in der die Aggregate sich immer noch in einem rotierenden Restgas befinden. Die Aggregate führen bei Beibehaltung ihrer Ausrichtung an das Führungsfeld eine Rotation durch und gelangen dabei relativ zueinander in unterschiedliche Positionen, was eine Anlagerung begünstigt. Im Falle der Levitationstrommel wird also nicht das Magnetfeld rotiert, sondern durch die Rotation der Aggregate im Restgas ihre Position, was ebenfalls zu höheren fraktalen Dimensionen führt.

Im Gegensatz zu den von Blum et al. (2000) experimentell erzeugten Aggregaten mit fraktalen Dimensionen um 1,3 liegen die fraktalen Dimensionen aller aus magnetischen Partikeln gewachsenen Aggregate mit Werten von 1,09 bis 1,20 darunter. Die magnetischen Kräfte der Partikel wirken sich also ordnend auf den Aggregationsprozeß aus. Der Einfluß von externen Magnetfeldern scheint diesem Ordnungsprozeß wiederum ein wenig entgegenzuwirken. Bei variablen Feldern erhöht sich dieser Effekt noch.

Alle diese beobachteten strukturellen Eigenschaften sprechen dafür, daß sowohl die Magnetisierung der Einzelpartikel als auch externe Magnetfelder einen Einfluß auf den Aggregationsprozeß haben und insbesondere die Struktur der entstandenen Aggregate be-

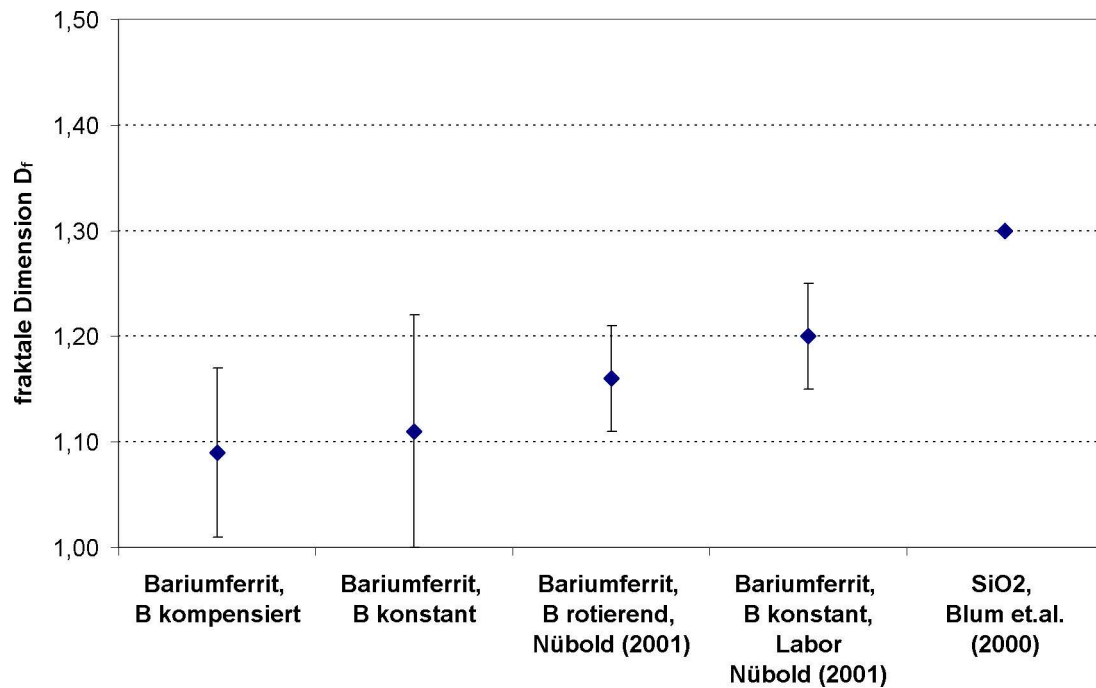


Abbildung 6.21: Gegenüberstellung der fraktalen Dimensionen von Aggregaten, die aus verschiedenen Materialien und unter verschiedenen magnetischen Bedingungen gewachsen sind. Neben den in Kapitel 6.5 diskutierten Werten für die fraktalen Dimensionen von Aggregaten, die unter konstanten beziehungsweise kompensierten Feldbedingungen gewachsen sind, werden hier Werte für Aggregate, die unter rotierendem Feld und unter Laborbedingungen in der Levitationstrommel (vgl. Kapitel 3.2) gewachsen sind, aus Nübold (2001) gezeigt. Zum Vergleich ist auch der von Blum et al. (2000) ermittelte Wert für die fraktale Dimension von unter Mikrogravitation während des CODAG-Experimentes aus unmagnetischem SiO₂ gewachsener Aggregate gezeigt.

einflussen. Es scheint, als würde die Magnetisierung der Partikel selber ein Wachstum von kleinen, zunächst linear strukturierten Aggregaten fördern, während ein anliegendes Führungsfeld das weitere Wachstum dieser linearen Strukturen zu netzartigen Gebilden begünstigt. Für diese These spricht insbesondere das nahezu völlige Fehlen von netzartigen Strukturen bei unter feldfreien Bedingungen gewachsenen Aggregaten. Eine Überprüfung dieses Zusammenhangs wäre mit Experimenten unter deutlich verlängerten Aggregationszeiten und höheren Magnetfeldern möglich.

Für die Entstehung von Planeten ist dieses Ergebnis dahingehend relevant, daß ein Wachstum von Aggregaten mit höherer fraktaler Dimension den weiteren Wachstumsprozeß beschleunigt. Lineare Aggregate haben einen relativ kleinen Wirkungsquerschnitt, der durch die Bildung von netzartigen Strukturen, also Strukturen mit höherer fraktaler Dimension, deutlich vergrößert wird. Diese Vergrößerung des Wirkungsquerschnitts führt dazu, daß die Aggregate einander häufiger begegnen und ein verstärktes Wachstum einsetzt. Somit scheinen sowohl magnetisierte Partikel, als auch externe Magnetfelder auf den Wachstumsprozeß in der frühen Entwicklung von Planetensystemen beschleunigend zu wirken.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangspunkt für diese Arbeit war die Beobachtung der parallelen Ausrichtung eines großen Teils der Aggregate, die bei den Experimenten der ADAM-Kampagne gefunden wurden. Die nähere Untersuchung der Ausrichtungswinkel (vgl. Kapitel 4.3) lieferte tatsächlich eine deutliche Ordnung der Aggregate, als deren Ursache das während der Experimente wirksame Erdmagnetfeld angesehen wurde. Eine überschlägige Berechnung der Auswirkung von externen Feldern auf die Rotationsdynamik der Aggregate (siehe Kapitel 4.4) und eine Bestimmung der im Flugzeug wirkenden Magnetfelder – sowohl experimentell als auch theoretisch (vgl. Kapitel 4.5) – führten schließlich zu der Einsicht, daß die Felder einen Einfluß auf den Aggregationsprozeß von magnetischen Partikeln haben.

Dabei ist der Einfluß von magnetischen Feldern nicht nur ein Störfaktor während der Versuchsdurchführung, den es zu vermeiden gilt, sondern eine durchaus zu beachtende Umgebungsbedingung während der Staubaggregation in protoplanetaren Scheiben. Innerhalb dieser Objekte sind sehr wohl Magnetfelder zu finden, die die hier verwendeten teilweise sogar noch deutlich überschreiten (vgl. Kapitel 2.3). Bei bisherigen Untersuchungen von Aggregationsprozessen im Zusammenhang mit der Entstehung von Körpern im Sonnensystem und in anderen Sternensystemen unter Verwendung von nichtmagnetischen Partikeln (z.B. Blum et al. 2000) waren externe Magnetfelder jedoch kaum von Bedeutung. Erst die Verwendung von magnetischen Partikeln durch Nübold (2001) in der experimentellen Untersuchung warf das Problem des Einflusses dieser Felder auf.

Die Experimente der ADAM+EVE-Kampagne und der CAIN+ABEL-Kampagne haben gezeigt, daß es – wenn auch mit erheblichem technischen Aufwand – möglich ist, ein System zu verwirklichen, das Aggregationsexperimente unter kontrollierten magnetischen Bedingungen erlaubt. Die Verwendung eines Spulensystems zu diesem Zweck ermöglichte es erst während der CAIN+ABEL-Kampagne, unter größeren konstanten Magnetfeldern Experimente durchzuführen. Daß es dabei zu kleineren Schwierigkeiten gekommen ist, ist durchaus üblich, da die Durchführung von Experimenten unter den erschwerten Bedingungen – sowohl für das Personal, als auch für das Material – eben nicht vergleichbar ist mit einem Labor, in dem man seinen Versuch beliebig oft unter verschiedensten Umgebungsbedingungen wiederholen kann. Dennoch wurden die Experimente mit Erfolg durchgeführt und abgeschlossen (vgl. Kapitel 6.1 und 6.2).

Die Ergebnisse zeigen, daß der Einfluß externer Magnetfelder auf den Aggregationsprozeß von magnetischen Partikeln geringer ist als zunächst erwartet. Die Aggregatausrichtung zeigt deutliche Unterschiede unter verschiedenen Magnetfeldern, was aber auf längeren Zeitskalen als den hier untersuchten nicht unbedingt einen Einfluß auf das Wachstum

der Aggregate haben muß (vgl. Kapitel 6.3). Das Längenwachstum der Aggregate weist unter verschiedenen Magnetfeldern zwar deutliche Unterschiede auf (vgl. Kapitel 6.4), doch es ist fraglich, ob dieses Verhalten auf den längeren Zeitskalen, auf denen die reale Aggregation in protoplanetaren Scheiben stattfindet, relevant ist. Einzig die Analyse der Struktur der gewonnenen Aggregate (siehe Kapitel 6.5) deutet auf einen auch auf langen Zeitskalen relevanten Einfluß der Magnetfelder auf den Aggregationsprozeß hin. Die bei Aggregaten, die unter konstanten Magnetfeldern um 50.000 nT entstanden sind, gemessenen und gegenüber den im feldfreien Raum entstandenen Aggregaten erhöhten fraktalen Dimensionen und die Beobachtungen von komplexen, netzartigen Strukturen bei diesen Aggregaten deuten darauf hin, daß der Einfluß der Felder hier am deutlichsten wirkt.

Offen bleiben die folgenden Fragen zum besseren Verständnis der Aggregation von magnetischen Mikrometerpartikeln unter unterschiedlichen magnetischen Bedingungen. Es liegen viele Möglichkeiten nahe, um eine qualitativ bessere Abschätzung des Einflusses von Magnetfeldern auf den Aggregationsprozeß von magnetisierten Mikrometerpartikeln zu erhalten:

- Wie wirkt sich die Stärke der anliegenden Felder aus? Experimente unter höheren Magnetfeldern wären interessant, um den Einfluß der Feldstärke auf den Aggregationsprozeß näher zu untersuchen. Dabei wären Experimente unter Feldern von 10^5 nT bis 10^6 nT sinnvoll, denn in diesem Bereich liegen die für protoplanetare Scheiben prognostizierten Magnetfelder. Problematisch hierbei wären allerdings die Erzeugung dieser Felder mit Hilfe eines Spulensystems und die Versorgung desselben mit Strom, der im Parabelflugzeug nicht unbegrenzt verfügbar ist. Der Einsatz eines Spulensystems zur Kompensation, beziehungsweise zur Erzeugung eines konstanten Feldes an Bord anderer Mikrogravitation erzeugender Systeme wie zum Beispiel Höhenforschungsraketen, Fallturmkapseln, Satelliten oder gar der Internationalen Raumstation ISS verbieten sich aus Platz- und/oder Energieversorgungsproblemen.
- Wie verhalten sich die Aggregate nach der kurzen Experimentierphase von 22 Sekunden? Eine (erhebliche) Verlängerung der Versuchsdauer wäre wünschenswert, um auch die weitere Entwicklung der Aggregate über die 20-sekündige Experimentierphase hinaus zu beobachten. Dazu müßte allerdings ebenfalls ein anderes System als der Parabelflug zum Einsatz kommen.
- Der Verlauf des Aggregationsprozesses unter kontrolliert variablen Magnetfeldern bleibt ebenfalls unbeantwortet. Auf welchen Skalen allerdings die Felder in protoplanetaren Scheiben variieren, läßt sich nur schwer ermitteln.
- Um die Möglichkeiten der statistischen Auswertung zu verbessern, wäre es gut, die Anzahl der durchgeführten Experimente deutlich zu erhöhen. Dann wäre auch eine Untersuchung des Einflusses der Stärke des Magnetfeldes möglich.
- Ein interessanter Aspekt ist die Abhängigkeit der hier gefundenen Phänomene von der Umgebungstemperatur. Bei Temperaturen um 290 K ist ein thermischer Einfluß

aufgrund der überwiegenden magnetischen Kräfte nicht zu erwarten, doch waren die Temperaturen in jungen Sternensystemen teilweise deutlich höher (vgl. Kapitel 2.1). Als Obergrenze für die Temperaturabhängigkeit sei hier nochmals die Curietemperatur erwähnt.

- Alle bisher genannten Variationen der Experimente sollten mit einer eingehenden Untersuchung des Aggregationsverhaltens von Mischungen von magnetischen mit nichtmagnetischen Partikeln in verschiedenen Anteilen verbunden werden. Dies würde die Frage klären, wie stark der Einfluß magnetischer Aggregation – insbesondere in Hinblick auf den Anteil des potentiell magnetischen Materials im frühen Sonnennebel – auf den Entstehungsprozeß von Planetesimalen ist.
- Als letztes wäre es interessant, das Einfrieren magnetischer Felder in auskristallisierende Mikrometerpartikel näher zu untersuchen. Dabei wäre vor allem die Abhängigkeit der Magnetisierung von der anliegenden Feldstärke und vom Verlauf der Temperatur während der Abkühlung interessant.

Mit den genannten Verbesserungen könnten quantitativ deutlich bessere Aussagen über die Auswirkungen von Magnetfeldern auf die Aggregation von magnetischen Partikeln gemacht werden. Der jetzige Stand des Wissens läßt die Umsetzung einiger dieser Verbesserungen schwierig bis unmöglich erscheinen.

A Technische Zeichnungen der Komponenten des Versuchsaufbaus

Der in der folgenden technischen Zeichnung A.1 abgebildete Staubvorsatz für die Staubkanone wurde konstruiert, um die Schußigenschaften der Kanone zu verbessern. Bei Experimenten der ADAM-Kampagne traten teilweise Fehlschüsse auf, da der einzuschießenden Staub sich in der Rückseite der Zündhütchen festgesetzt hatte und die elektrische Zündung verhinderte. Dieses Problem wurde zeitweise dadurch gelöst, daß der Schußkanal mit einem kleinen Pfropfen verschlossen wurde, bevor der Staub eingefüllt wurde. Das Material des Pfropfens befand sich nach den Experimenten zum Teil auf den Probenträgern, was die Auswertung erschwerte. Um dieses Verfahren zu verbessern, wurde ein Vorsatz konstruiert, der den Staub aufnimmt und jeweils von vorne und von hinten mit einer dünnen Aluminiumfolie verschlossen wird. Dieser Vorsatz wird dann vor die Schußkanäle geschraubt.

Konstruktionszeichnungen anderer wesentlicher Komponenten des Versuchsaufbaus, wie zum Beispiel der Vakuumkammer und des Probensammelmechanismus sind in Rost (2001) zu finden.

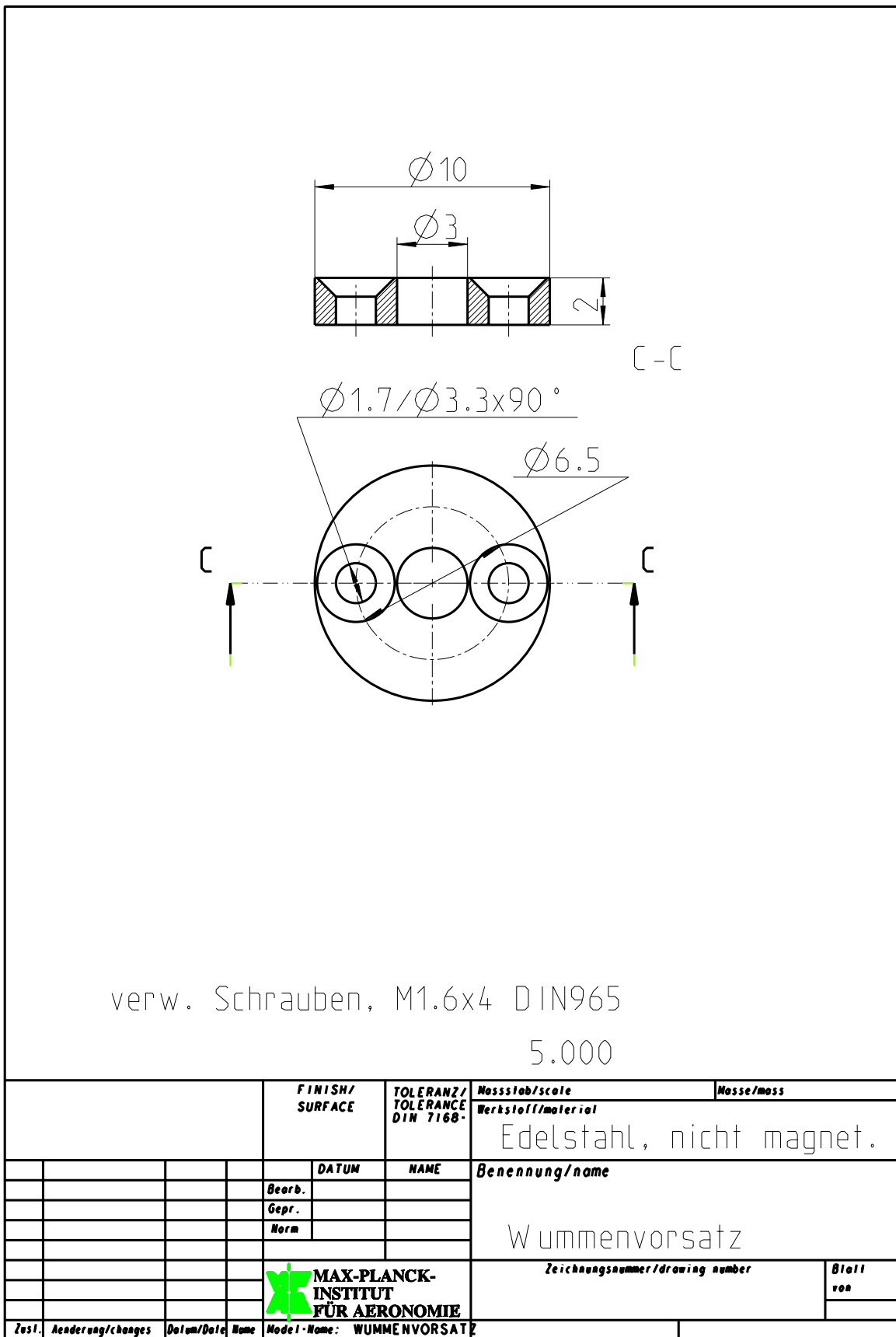


Abbildung A.1: Staubvorsatz für die Staubkanone

B Elektronische Schaltpläne

Die folgenden Abbildungen zeigen die wichtigen elektronischen Komponenten, die für die Experimente angefertigt wurden. Es handelt sich um die Schaltungen für die Kompensationselektronik und den Beschleunigungssensor. Die Grafiken wurden freundlicherweise von der Elektronikwerkstatt angefertigt.

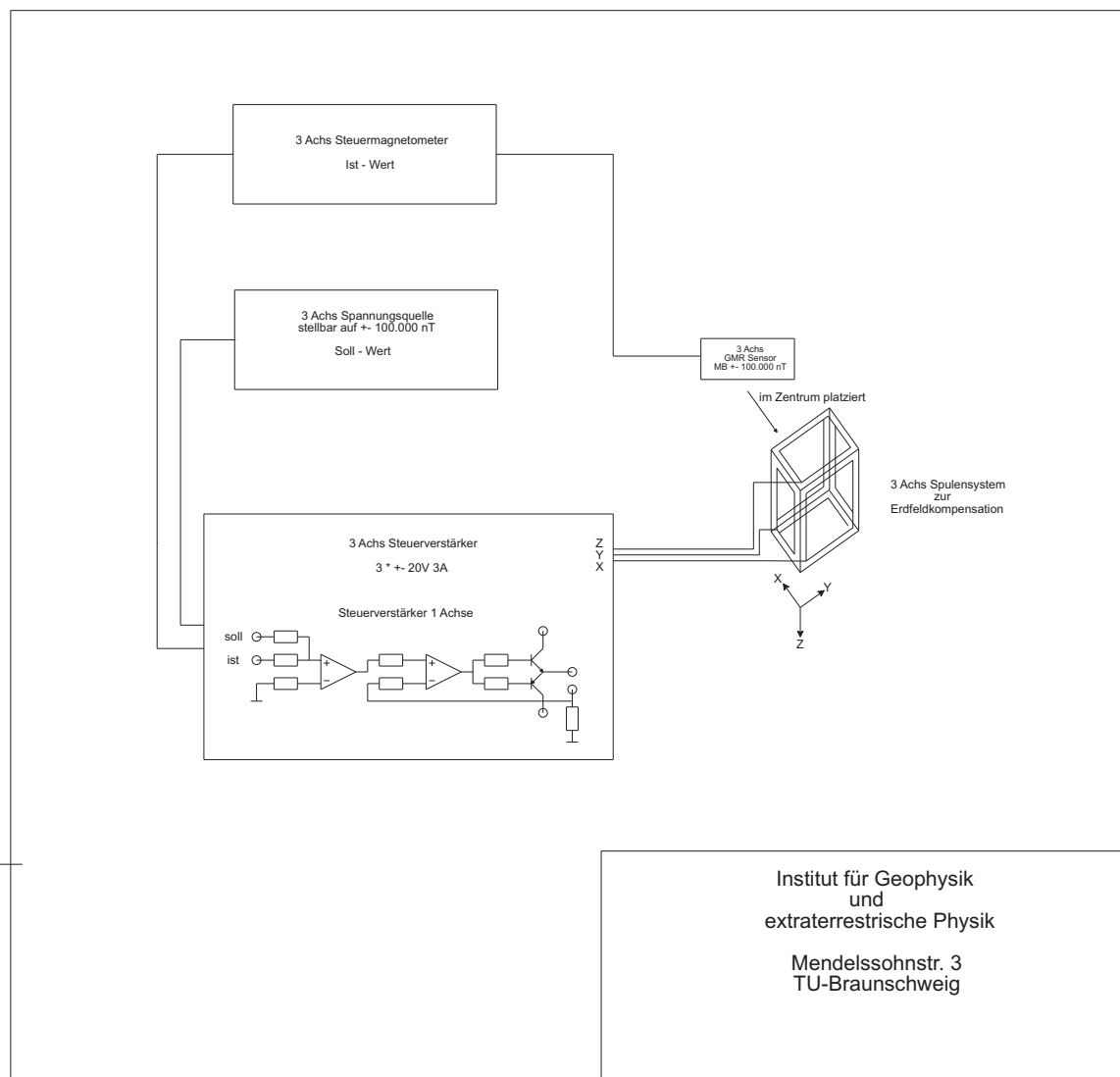
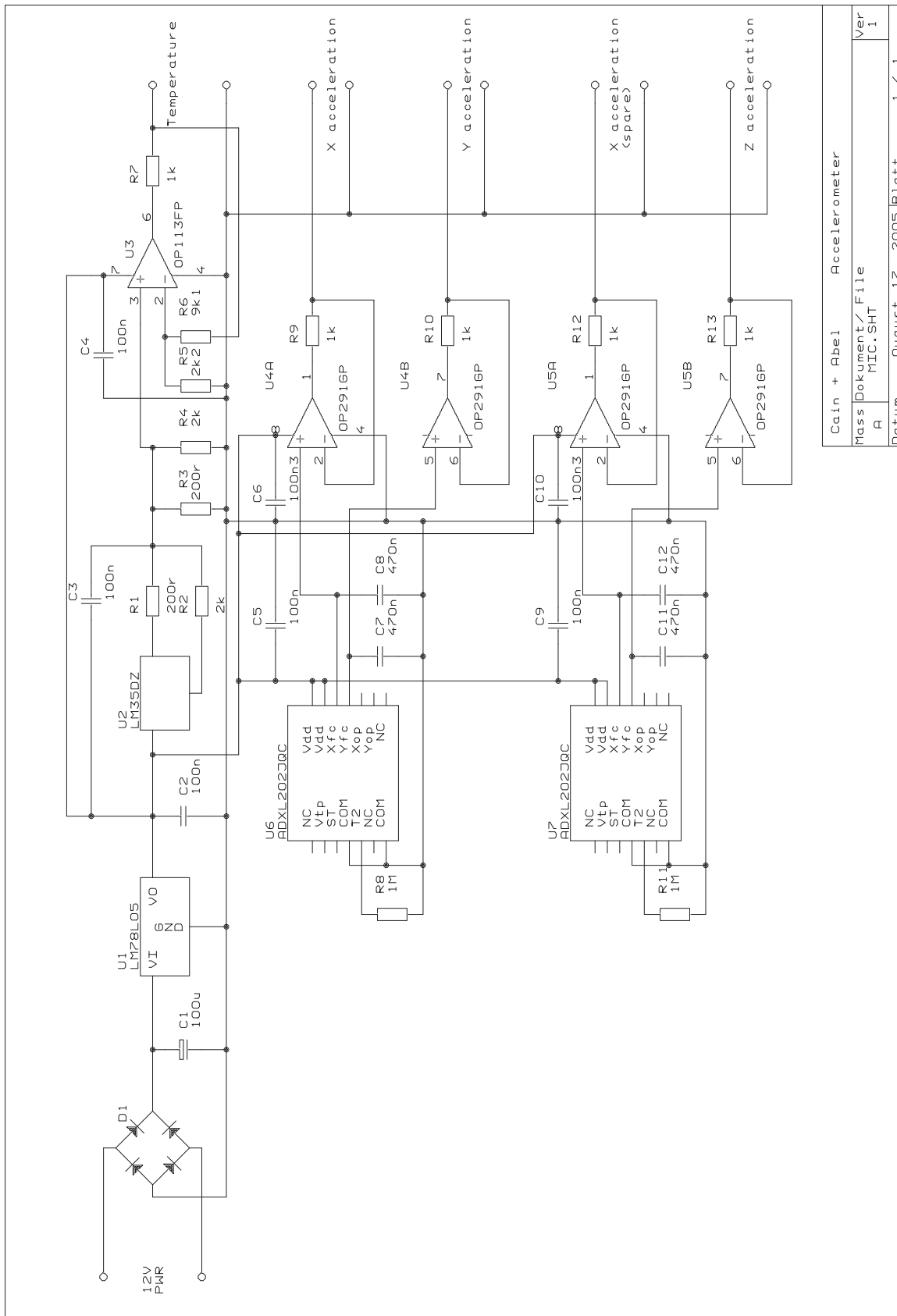


Abbildung B.1: Schematischer Plan des Kompensationssystems



Cain + Abel		Accelerometer	
Mass	Dokument/ File		
A	MIC.SHT		
Datum	August 17, 2005	Blatt	1 / 1
Ver	1		

Abbildung B.2: Elektronischer Schaltplan des Beschleunigungssensors

Literaturverzeichnis

- AUSTER, U., *Persönliche Mitteilung*, 2002.
- BECKWITH, S.V.W, HENNING, TH., UND NAKAGAWA, Y., *Dust Properties and Assembly of Large Particles in Protoplanetary Disks*, in Protostars and Planets IV, Mannings, V., Boss, A.P., und Russell, S.S., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 2000, S. 533–558.
- BLUM, J., WURM, G., POPPE, T., UND HEIM, L.-O., *Aspects of Laboratory Dust Aggregation with Relevance to the Formation of Planetesimals*, Earth, Moon and Planets, 80, 1999, S. 285–309.
- BLUM, J., WURM, G., KEMPF, S., POPPE, T., KLAHR, H., KOZASA, T., ROTT, M., HENNING, T., DORSCHNER, J., SCHRÄPLER, R., KELLER, U., MARKIEWICZ, W.J., MANN, I., GUSTAFSON, B.A.S., GIOVANE, F., NEUHAUS, D., FECHTIG, H., GRÜN, E., FEUERBACHER, B., KOCHLAN, H., RATKE, L., GOSERY, A. EL, MORFILL, G., WEIDENSCHILLING, S.J., SCHWEHM, G., METZLER, K., UND IP, W.-H., *Growth and Form of Planetary Seedlings: Results from a Microgravity Aggregation Experiment*, Physical Review Letters, 85, 2000, S. 2426–2429.
- BLUM, J. UND WURM, G., *Experiments on Sticking, Restructuring, and Fragmentation of Preplanetary Dust Aggregates*, Icarus, 143, 2000, S. 138–146.
- BLUM, J., *Dust Agglomeration*, Advances in Physics, submitted, 2006.
- BOLL, R., *Weichmagnetische Werkstoffe*, 1990. Vakuumschmelze GmbH, Hanau.
- BOYNTON, W. V., *Meteoritic Evidence Concerning Conditions in the Solar Nebula*, in Protostars and Planets II, Black, D.C. und Shapley Matthews, M., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 1985, S. 772–787.
- BROWN, M. E., *S/2005 (2003 UB313) 1*, Central Bureau Electronic Telegrams, 240, 1 (2005). Edited by Green, D. W. E., 240, 2005.
- CALAVET, N., HARTMANN, L., UND STROM, S.E., *Evolution of disk accretion*, in Protostars and Planets IV, Mannings, V., Boss, A.P., und Russell, S.S., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 2000, S. 559–587.
- CAMERON, A. G. W., *Physical conditions in the primitive solar nebula*, in Meteorite Research, 1969, S. 7–15.

- CHAISSON, E. J. UND VBRA, F. J., *Magnetic Field Structures and Strengths in Dark Clouds*, in *Protostars and Planets*, Gehrels, T. und Shapley Matthews, M., Hrsg., University of Arizona Press, 1978, S. 189.
- CHOKSHI, A., TIELENS, A.G.G.M., UND HOLLENBACH, D., *Dust Coagulation*, *Astrophysical Journal*, 407, 1993, S. 806–810.
- DAHNEKE, B.E., *The Capture of Aerosol Particles by Surfaces*, *Journal of Colloid and Interface Science*, 37, 1971, S. 342–535.
- DOMINIK, C. UND NÜBOLD, H., *Magnetic Aggregation: Dynamics and Numerical Modelling*, *Icarus*, 157, 2002, S. 173–186.
- DOMINIK, C. UND TIELENS, A.G.G.M., *Resistance to Rolling in Adhesive Contact of Two Elastic Spheres*, *Philosophical Magazine*, 72, 1995, S. 783–803.
- DOMINIK, C. UND TIELENS, A.G.G.M., *Resistance to Sliding on Atomic Scales in the Adhesive Contact of two Elastic Spheres*, *Philosophical Magazine*, 73, 1996, S. 1279–1302.
- DOMINIK, C. UND TIELENS, A.G.G.M., *The Physics of Dust Coagulation and the Structure of Dust Aggregates in Space*, *Astrophysical Journal*, 480, 1997, S. 647–673.
- ESA, *ESA Sounding Rocket Programme*. <http://www.estec.esa.nl/spaceflight/map/ao/sounding.htm>, 2005.
- FARESTAM, T. UND NIKLASSON, G.A., *Projection effects in electron micrographs of three-dimensional fractal aggregates: Theory and application to gas-evaporated specimen*, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1, 1989, S. 2451–2463.
- FERRAROTTI, A.S. UND GAIL, H.-P., *Mineral Formation in Stellar Winds: IV Formation of Magnetowüstite*, *Astronomy and Astrophysics*, 398, 2003, S. 1029–1039.
- GAIL, H.-P., *Chemical Reactions in Protoplanetary Accretion Disks: IV. Multicomponent Dust Mixture*, *Astronomy and Astrophysics*, 332, 1998, S. 1099–1122.
- GALILEO, G., *Dialogo di Galileo Galilei sopra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano*, Florenz, 1630.
- GOLDREICH, P. UND WARD, W. R., *The Formation of Planetesimals*, *Astrophysical Journal*, 183, 1973, S. 1051–1061.
- GROSSER, J., *Persönliche Mitteilung*, 2004.
- HALL, J.S., *Observations of the Polarized Light from Stars*, *Science*, 109, 1949, S. 166.
- HEIM, L.-O., BLUM, J., PREUSS, M., UND BUTT, H.J., *Adhesion and Friction Forces between Micrometer-sized Particles*, *Physical Review Letters*, 83-16, 1999, S. 3328.
- HELGESEN, G., SKJELTORP, A.T., MORS, P.M., BOTET, R., UND JULLIEN, R., *Aggregation of Magnetic Microspheres: Experiments and Simulations*, *Physical Review Letters*, 61, 1988, S. 1736–1739.

- HILTNER, W.A., *Polarization of Light from Distant Stars by Interstellar Medium*, Science, 109, 1949, S. 165.
- HOLLENBACH, D.J., YORKE, H.W., UND JOHNSTONE, D., *Disk Dispersal around Young Stars*, in Protostars and Planets IV, Mannings, V., Boss, A.P., und Russell, S.S., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 2000, S. 401–428.
- HST-IMAGES, *The Best of the Hubble Space Telescope*. <http://www.seds.org/hst/hst.html>, 2005.
- JACOBS, I.S. UND BEAN, C.P., *An approach to elongated fine-particle magnets*, Physical Review, 100, 1955, S. 1060–1067.
- JOHNSON, K.L., KENDALL, K., UND ROBERTS, A.D., *Surface Energy and the Contact of Elastic Solids*, Proc. R. Soc. Lond. A Procedures of the Royal Society London A, 324, 1971, S. 301–313.
- JONES, R.H., LEE, T., CONOLLY JR., H.C., LOVE, S.G., UND SHANG, H., *Formation of Chondrules and CAIs: Theory vs. Observation*, in Protostars and Planets IV, Mannings, V., Boss, A.P., und Russell, S.S., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 2000, S. 927–062.
- KAMKE, E., *Differentialgleichungen*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig, Leipzig, 5. Auflage, 1956.
- KANT, I., *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*, Königsberg, 1755.
- KARTUNNEN, E., KRÖGER, P., OJA, H., POUTANEN, M., UND DONNER, K. J., *Fundamental Astronomy*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1987.
- KEMPF, S., *Mikrophysik und Dynamik des brownischen Staubwachstums in protoplanetaren Scheiben*, Dissertation, Astrophysikalisches Institut, Friedrich-Schiller-Universität, Jena, 1997.
- KEPLER, J., *Astronomia nova*, Prag, 1609.
- KERRIDGE, J.F., *What can meteorites tell us about nebular conditions and processes during planetesimal accretion?*, Icarus, 106, 1993, S. 135–150.
- KERTZ, W., *Einführung in die Geophysik I+II*, Bibliographisches Institut, Mannheim, 1992.
- KITTEL, CH., *Physical Theory of Ferromagnetic Domains*, Reviews of Modern Physics, 21, 1949, S. 541–583.
- KITTEL, CH., *Einführung in die Festkörperphysik*, Oldenbourg Verlag, München, 12. Auflage, 1999.
- KIVELSON, M. G., BARGATZE, L.F., KHURANA, K.K., SOUTHWOOD, D.J., WALKER, R. J., UND COLEMAN, P. J., *Magnetic Field Signatures Near Galileo's Closest Approach to Gaspra*, Science, 261, 1993, S. 331–334.

- KOPERNIKUS, N., *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, Nürnberg, 1543.
- LAPLACE, P. S., *Exposition du système du monde*, Paris, 1796.
- LEVY, E. H. UND SONETT, C.P., *Meteorite Magnetism and Early Solar System Magnetic Fields*, in Protostars and Planets, Gehrels, T. und Shapley Matthews, M., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 1978, S. 516.
- LEVY, E. H., *Magnetic field in the primitive solar nebular*, Nature, 276, 1978, S. 481.
- LEWIS, J. S., *Metal/Silicate Fractionation in the Solar System*, Earth and Planetary Science Letters, 15, 1972, S. 174–185.
- LUNINE, J.I., OWEN, T.C., UND BROWN, R.H., *The Outer Solar System: Chemical Constraints at Low Temperatures on Planet Formation*, in Protostars and Planets IV, Mannings, V., Boss, A.P., und Russell, S.S., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 2000, S. 1055–1080.
- MANDELBROT, B. B., *The fractal geometry of nature*, Freeman, 1982.
- MARCY, G.W., COCHRAN, W.D., UND MAYOR, M., *Extrasolar Planets around Main-Sequence Stars*, in Protostars and Planets IV, Mannings, V., Boss, A.P., und Russell, S.S., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 2000, S. 1285–1311.
- MEAKIN, P. UND DONN, B., *Fractal aggregates in geophysics*, Reviews of Geophysics, 29, 1991, S. 317–354.
- MEIBOM, A., PETAEV, M.I., KROT, A.N., WOOD, J.A., UND KEIL, K., *Primitive FeNi metal grains in CH carbonaceous chondrites formed by condensation from a gas of solar composition*, Journal of Geophysical Research, 104, 1999, S. 22053–22059.
- MORFILL, G.E., TSCHARNUTER, W., UND VÖLK, H.J., *Dynamical and Chemical Evolution of the Protoplanetary Nebula*, in Protostars and Planets II, Black, D.C. und Shapley Matthews, M., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 1985, S. 493.
- NATTA, A., GRININ, V.P., UND MANNINGS, V., *Properties and Evolution of Disks around Pre-Main-Sequence Stars of Intermediate Mass*, in Protostars and Planets IV, Mannings, V., Boss, A.P., und Russell, S.S., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 2000, S. 559–587.
- NÉEL, L., *Magnetic Properties of Ferrites: Ferromagnetism and Antiferromagnetism*, Ann. Physique, 137, 1942, S. 198.
- NEUHAUS, D., *Vorrichtung zum Erzeugen einer stehenden Partikelwolke in einem insbesondere einen Unterdruck aufweisenden Volumen*. Europäische Patentschrift EP 0879094, 1999.
- NOVSPACE, *Briefing and safety instructions*. Einweisung anlässlich der 36. und 40. ESA Parabelflugkampagne, 2004/5.

- NÜBOLD, H., POPPE, T., ROST, M., UND GLASSMEIER, K.-H., *Magnetic Aggregation II: Laboratory and Microgravity Experiments*, Icarus, 165, 2003, S. 195–214.
- NÜBOLD, H. UND GLASSMEIER, K.-H., *Coagulation and Accretion of Magnetized Dust: A Source for Remanent Cometary Magnetization?*, Advanced Space Research, 24-9, 1999, S. 1163–1166.
- NÜBOLD, H. UND GLASSMEIER, K.-H., *Accretional Remanence of Magnetized Dust in the Solar Nebula*, Icarus, 144, 2000, S. 149–159.
- NÜBOLD, H., *Experiments and Numerical Simulations on Preplanetary Dust Aggregation with Magnetized Particles*, Dissertation, Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 2001.
- NUTH, J.A. III, BERG, O., FARIS, J., UND WASILEWSKI, P., *Magnetically Enhanced Coagulation of Very Small Iron Grains*, Icarus, 107, 1994, S. 155–163.
- POLLACK, J.B., HOLLENBACH, D., BECKWITH, S., SIMONELLI, D.P., ROUSH, T., UND FONG, W., *Composition and Radiative Properties of Grains in Molecular Clouds and Accretion Disks*, Astrophysical Journal, 421, 1994, S. 615.
- POPPE, T., BLUM, J., UND HENNING, TH., *Generating a jet of deagglomerated small particles in vacuum*, Review of Scientific Instruments, 68 (6), 1997, S. 2529–2533.
- POPPE, T., BLUM, J., UND HENNING, TH., *Experiments on Collisional Grain Charging of Micron-sized Preplanetary Grains*, Astrophysical Journal, 533, 2000a, S. 472–480.
- POPPE, T., BLUM, J., UND HENNING, TH., *Analogous Experiments on the stickiness of Micron-Sized Preplanetary Dust*, Astrophysical Journal, 533, 2000b, S. 454–471.
- POPPE, T., *Stoßexperimente zur Entstehung von Planetesimalen aus kleinen Festkörperteilchen*, Dissertation, Astrophysikalisches Institut, Friedrich-Schiller-Universität, Jena, 1998.
- POPPE, T., *Persönliche Mitteilung*, 2000.
- RAITH, W. (HRSG.), *Bergmann Schaefer Experimentalphysik: Sterne und Weltraum*, Band 8, de Gruyter, Berlin, 1997.
- RICHTER, I., BRINZA, D.E., CASSEL, M., GLASSMEIER, K.-K., KUHNKE, F., MÜLLER, G., OTHMER, C., SCHWINGENSCHUH, K., UND TSURUTANI, B.T., *First Direct Magnetic Field Measurement of an Astroidal Magnetic Field*, Geophysical Research Letters, 28(10), 2001, S. 1913–1916.
- ROST, M., *Entwicklung eines präplanetaren Staubwachstumsexperimentes für die Mikrogravitation*, Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie, TU Braunschweig, Oktober 2001.
- RYDGREN, A.E. UND COHEN, M., *Young stellar objects and their circumstellar dust: An overview*, in Protostars and Planets II, Black, D.C. und Shapley Matthews, M., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 1985, S. 772–787.

- SAFRONOV, V. S., *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and Planets*, NASA TTF, 677, 1973.
- SANTOS, N.C., ISRAELIAN, G., MAYOR, M., REBOLO, R., UND UDRY, S., *Statistical properties of exoplanets*, *Astronomy and Astrophysics*, 398, 2003, S. 363–376.
- SCHMUTZER, E., *Theoretische Physik*, Band 1, BI Wissenschaftsverlag, Zürich, 1989.
- SCHNEIDER, J., *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*. <http://www.obspm.fr/planets/>, 2005.
- SCHULZE, H. J., KISSEL, J., UND JESSBERGER, E. K., *Chemistry and Mineralogy of Halley's Dust*, ASP Conference Series, 122, 1997, S. 397.
- STROM, S. E., EDWARDS, S., UND SKRUTSKI, M., *Evolutionary Time Scales for Circumstellar Disks Associated with Intermediate and Solar-type Stars*, in *Protostars and Planets III*, Levy, E. und Lunine, J.I., Hrsg., Band 3, The University of Arizona Press, Tucson, 1993, S. 837–866.
- TSAI, S.R., PUI, D.Y.H., UND LIU, B.Y.H., *Capture and Rebound of Small Particles upon Impact with Solid Surfaces*, *Aerosol Science and Technology*, 12, 1992, S. 497–507.
- UNSÖLD, A. UND BASCHEK, *Der neue Kosmos*, Springer Verlag, 6. Auflage, 1999.
- VAN DEN ANCKER, M.E., BOUWMAN, J., WESSELIUS, P.R., WATERS, L.B.F.M., DOUGERTY, S.M., UND DISHOECK, E.F., *ISO Spectroscopy of circumstellar dust in the Herbig AE systems AB Aur and HD 163296**, *Astronomy and Astrophysics*, 357, 2000, S. 325–329.
- WADHWA, M. UND RUSSEL, S.S., *Timescales of Accretion and Differentiation in the Early Solar System: The Meteoric Evidence*, in *Protostars and Planets IV*, Mannings, V., Boss, A.P., und Russell, S.S., Hrsg., The University of Arizona Press, Tucson, 2000, S. 995–1018.
- WEIDENSCHILLING, S. J., DONN, J. B., UND MEAKIN, P., *The Physics of Planetesimal Formation*, in *The Formation and Evolution of Planetary Systems*, Cambridge University Press, 1989, S. 131–150.
- WEIDENSCHILLING, S. J. UND CUZZI, J.N., *Formation of Planetesimals in the Solar Nebula*, in *Protostars and Planets III*, Levy, E. und Lunine, J.I., Hrsg., The University of Arizona Press, 1993, S. 1031–1060.
- WEIDENSCHILLING, S. J., *Can Gravitational Instability Form Planetesimals?*, *Icarus*, 116, 1995, S. 433.
- WEINTRAUB, D.A., GOODMAN, A.A., UND AKESON, R.L., *Polarized Light from Star-forming Regions*, in *Protostars and Planets IV*, Mannings, V., Boss, A.P., und Russell, S.S., Hrsg., The University of Arizona Press, 2000, S. 247–271.

WENT, J. J., RATHENAU, G. W., GORTER, E. W., UND VON OOSTERHOUT, G. W., *Ferroxdure, eine Gruppe neuer Werkstoffe für Dauermagnete*, Philips's Technische Rundschau, 12, 1952, S. 361–376.

WURM, G. UND BLUM, J., *Experiments on Preplanetary Dust Aggregation*, Icarus, 132, 1998, S. 125–136.

WURM, G., *Experimentelle Untersuchungen zu Bewegung und Agglomerationsverhalten mikrometergroßer Teilchen in protoplanetaren Scheiben*, Dissertation, Astrophysikalisches Institut, Friedrich-Schiller-Universität, Jena, 1997.

ZARM, *Webseite des Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation*. <http://www.zarm.uni-bremen.de/>, 2005.

Danksagung

Es ist geschafft – nach Jahren der Vorbereitungen und Experimente hätte ich nicht gedacht, daß es am Ende so schnell geht. Für immerwährende und kompetente Unterstützung möchte ich mich bei folgenden Personen herzlich bedanken:

Bei **Karl-Heinz Glaßmeier** für die Betreuung dieser Arbeit und seine kontinuierliche Unterstützung.

Bei **Torsten Poppe** für seine stete Bereitschaft zur Diskussion, seine Anregungen und seine Hilfe insbesondere in der Endphase dieser Arbeit, sowie seine Teilnahme und Hilfe im Zuge der Vorbereitung und Durchführung der Parabelflugkampagnen.

Bei **Jürgen Blum** für die fachliche Unterstützung und die Hilfe bei der Zusammenarbeit mit der ESA. Außerdem möchte ich ihm für das Referieren dieser Arbeit danken.

Bei **Gunter Knaak**(†), **Bernd Stoll**, **Ernst Jelting** und **Katrin Gebauer**, die große Teile des Versuchsaufbaus erstellt haben.

Bei **Frédéric Gai**, Firma Novespace, für die gute Zusammenarbeit im Zuge der Vorbereitungen und der Durchführung der Parabelflugkampagnen.

Bei **Vladimir Pletzer** für die freundliche Zusammenarbeit mit dem *ESA Directorate of Manned Spaceflight and Microgravity*.

Weiterhin möchte ich allen bisher nicht genannten Personen danken, die sowohl bei Aufbau und Durchführung der Experimente in Braunschweig und in Bordeaux als auch bei der Planung und Konstruktion des Versuchsaufbaus mitgewirkt haben. Außerdem bei den Personen, die mir stets mit gutem Rat und Tips zur Seite gestanden haben. Dies sind namentlich **Ingo von Borstel**, **Bernd Chares**, **Jean-Mathias Grießmeier**, **Holger Jönnen**, **Gero Kleindienst**, **Joachim Müller**, **Silja Schmidtchen**, **Kerstin Schulze**, **Tilman Springborn**.

...und natürlich bei allen anderen **Mitgliedern des IGEP**, die ich in den letzten Jahren mit meinem Fragen belästigt habe.

Bei **Kerstin Schulze**, **Torsten Poppe**, **Anja Stadelmann** und **Ulrich Dämmgen** möchte ich mich für das Korrekturlesen der Arbeit bedanken.

Zu guterletzt danke ich meinen **Eltern**, insbesondere meiner **Mutter**, ohne deren kontinuierliche Unterstützung in meinem bisherigen Lebensweg diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Die **Magnetfabrik Bonn** stellte freundlicherweise kostenlos den verwendeten Bariumferritstaub zu Verfügung.

Teile der Konstruktion des Versuchsaufbaus wurden vom **Institut für Kondensierte Materie** der TU Braunschweig und vom **Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung** in Kathlenburg-Lindau unterstützt.

Diese Arbeit wurde von der **Deutschen Forschungsgemeinschaft** im Rahmen des Projektes GL 142/13 „*Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Entstehung permanenter Magnetisierung in primitiven Himmelskörpern*“ unterstützt.

Diese Arbeit wurde von der **Europäischen Raumfahrtagentur ESA** durch die Teilnahme an „*The 36 ESA parabolic flight campaign*“ und „*The 40 ESA parabolic flight campaign*“ unterstützt.

Curriculum Vitae

Personalien

Name: Michael Rost
Geburtsdatum: 12. April 1974
Geburtsort: Braunschweig
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig
Eltern: Harald Rost
Jutta Rost, geb. Kühne

Schulbildung:

Grundschule Watenbüttel	1980-1984
Orientierungsstufe Lehdorf	1984-1986
Hoffmann-von-Fallersleben-Gymnasium, Braunschweig	1986-1993
Allgemeine Hochschulreife	Mai 1993

Wehrdienst:

Grundausbildung in Osterode	1993
Wehrdienst in Hildesheim	1994

Universitätsbesuch

Studium der Physik, TU Braunschweig	1994-2001
Vordiplom in Physik	September 1997
Diplom in Physik	November 2001

Die Diplomarbeit über die *Entwicklung eines prä-planetaren Staubwachstumsexperimentes für die Mikrogravitation* wurde am Institut für Geophysik und Meteorologie angefertigt.

Bisherige Tätigkeiten:

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geophysik
und Meteorologie / Institut für Geophysik und extra-
terrestrische Physik der TU Braunschweig Januar 2002
bis Dezember 2005

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Physikalisch Technischen
Bundesanstalt im Fachbereich Zeit und Frequenz seit September 2005