Untersuchung des Strahlungsdrucks auf dünne Folien unter Weltraumbedingungen

Von der Fakultät MINT - Mathematik, Informatik, Physik,
Elektro- und Informationstechnik

der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg

genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Naturwissenschaft
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von

Diplom - Ingenieurin (FH)
Nauka Melnik

geboren am 26. Juni 1980 in Nordhorn

Vorsitzender: Prof. Dr. techn. Peter Weger
Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Jürgen Reif
Gutachter: Apl.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Reiner Schmid
Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Ulrich R.M.E. Geppert

Tag der mündlichen Prüfung: 07.06.2018

ERRATA
zur ersten Auflage

- In Kapitel 2.2 auf Seite 17

  Gleichung (2.6): $P_S = 9 \cdot 10^{-9} N/m^2$ geändert zu: $P_S = 9 \cdot 10^{-6} N/m^2$

- In Kapitel 2.4.2 auf Seite 28

  Minuszeichen im Exponent ergänzt: $3{,}6*10^{-19}$ Nm und $2*10^{-19}$ Nm
  sowie Gleichung (2.34): $E = \frac{m \cdot v^2}{2}$ geändert zu: $E = \frac{m \cdot {v_F}^2}{2}$

- In Kapitel 4.3.2 auf Seite 56

  Bildunterschrift: „Abbildung 4.5: Strahlungsdruck in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck (M3, M4, M5)“ geändert zu: „Abbildung 4.5: Masseänderung in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck (M3, M4, M5)“

- Kapitel 5.2.1 ab Seite 62

  Gleichung (5.1): $\mathrm{m_0} = \mathrm{n}\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{N_A}} = \mathrm{M_r} \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-21}\mathrm{kg}$
  geändert zu: $\mathrm{m_0} = \mathrm{n}\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{N_A}} = \mathrm{M_r} \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\mathrm{kg}$
  Aus dieser falschen Berechnung der Masse m_0 ergebenen sich Folgefehler, wie die Anzahl der Wassermoleküle, die in dem Kapitel ebenfalls geändert wurden. Zusätzlich wurden die Abbildungen 5.1, 5.2, 5.3 und 5.5 zur besseren Veranschaulichung geändert.

- In Kapitel 5.2.1 auf Seite 66

  Bildunterschrift: „Abbildung 5.4: Strahlungsdruck in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck“ geändert zu: „Abbildung 5.4: Masseänderung in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck“

Vorwort

Nach nunmehr zwölf Jahren, in denen viele einschneidende Ereignisse in meinem Leben die Durchführung dieser Dissertation begleitet haben, bedanke ich mich an dieser Stelle bei all denen, die mich bei der Verwirklichung meiner Dissertation tatkräftig unterstützt und mir diese lange Zeit zur Seite gestanden haben:

Herrn Prof. Dr. Jürgen Reif danke ich für die Möglichkeit meine Promotion an seinem Lehrstuhl durchführen zu können, die (lange) Betreuung meiner Arbeit und die Gewährung großer wissenschaftlicher Freiräume für ein selbstständiges Arbeiten.

Herrn Prof. Dr. U.R.M.E. Geppert, dir danke ich für alles; insbesondere für die Korrektur meines Manuskripts einhergehend mit der ehrlichen und direkten Kritik sowie die Übernahme des Zweitgutachtens.

Den Herren Dr. Bernd Biering und Dr. Franz Lura danke ich für die interessante Themenstellung, die Geburt dieser Arbeit sowie für die exzellente wissenschaftliche Betreuung durch eine Harmonie aus steter Förderung und Forderung.

Ich danke dem gesamten Team der Abteilung Systemkonditionierung für die vielen guten Ideen und hilfreichen Diskussionen vor allem in den Frühstücksrunden. Ich danke euch auch für ein wundervolles („sozial-demokratisches“) Arbeitsklima, indem ich mich entfalten konnte. Euer Teamgeist hat mich sehr inspiriert.
Im Speziellen möchte ich mich bei Herrn Hans Gerstung bedanken, der mir stets tatkräftig zur Seite stand und immer einen praktischen Tipp parat hatte. Hansi du fehlst mir!

Ferner danke ich meinen Kollegen der Abteilung Mechanik und Thermalsysteme für die gute Zusammenarbeit und die Hilfe bei jeglichen Problemen; insbesondere danke ich Herrn Dr. Volodymyr Baturkin für das geduldige Nachharken und das Vertrauen in meine Ausdauer sowie Herrn Patric Seefeldt für viele wertvolle Anregungen.

Ein herzlicher Dank geht an Frau Christina Schepker und Herrn Nicolas Darkow für das schnelle Korrekturlesen meiner Arbeit.
Bei meinen Freunden und meinem Bruder, die mich all die Jahre immerwährend unterstützt haben, bedanke ich ebenfalls ganz herzlich.
Ein besonders herzlicher Dank an meine Mutter, die immer hinter mir steht, und an meinen Ehemann für die jahrelange Unterstützung, die Motivation und das Vertrauen.

Ich danke euch Elias, Janek und Henri. Ihr seid mein Herz.

„Am Ende wird alles gut.
Wenn es nicht gut wird,
ist es noch nicht das Ende“
Oscar Wilde

Kurzfassung

Trifft elektromagnetische Strahlung auf einen Körper, geben die Photonen ihren Impuls ab, bei einer idealen Reflexion sogar den doppelten Impuls. Auf die Oberfläche des bestrahlten Körpers wird somit eine Kraft ausgeübt. Dieser Strahlungsdruck ist extrem gering, jedoch ergeben sich unter speziellen Bedingungen, wie bei einer Anwendung im luftleeren Raum des Weltalls, konkrete effektive Einsatzbereiche. Die Anwendung des Strahlungsdrucks als Antriebsmittel im Bereich der Raumfahrt ist der Ausgangspunkt folgender Dissertation. Großflächige reflektierende Folien können den Strahlungsdruck der Sonne als spezielles Antriebsmittel für Raumfahrzeuge, sogenannte Sonnensegler, nutzen. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Messeinrichtung zur Analyse der Kraftwirkung durch sonnenähnliche Strahlung auf dünne, reflektierende Folien. Des Weiteren wird die Messeinrichtung durch verschiedene Messreihen verifiziert, auftretende Effekte werden charakterisiert. Die Messeinrichtung ist in einer Hochvakuumkammer installiert. Der Strahlungsdruck wird durch eine 1600W Xenon Lampe mit sonnenähnlichem Spektrum auf eine 7,5 µm dicke, mit Aluminium beschichtete Kaptonfolie ausgeübt. Die resultierende Krafteinwirkung auf die Folienoberfläche wird mittels einer Präzisionswaage gemessen. In mehreren Testreihen werden Folienproben unterschiedlichen Bestrahlungsstärken ausgesetzt. Die experimentell ermittelten Messdaten bestätigen die theoretisch berechneten Werte des Strahlungsdrucks. Darüber hinaus zeigt sich im Verlauf der Experimente ein bisher unbeachteter Effekt. An der Folienoberfläche haften unter Atmosphäre Wassermolekülschichten, welche im Vakuum zunächst an der Folie haften bleiben. Diese Moleküle werden erst bei Bestrahlung von der Oberfläche desorbiert. Der Impuls durch die entweichenden Moleküle ist um ein Vielfaches größer als der Impuls der Photonen. Dieser Effekt beeinträchtigt die Strahlungsdruckmessung. Um die störenden Einflüsse zu eliminieren, sind in einer Testprozedur Randbedingungen definiert worden.

Abstract

Photons of electromagnetic radiation transfer their momentum on bodies; an ideally reflecting surface doubles the value of the momentum. Thus, a force is acting on the radiated surface of that body. The value of this radiation pressure is rather small, but under special condition, like use in exhausted outer space, there is real effective range of application. The initial point of this thesis is the application of radiation pressure as space propulsion. Large areas of reflective thin films can use the solar radiation pressure for a special type of propulsion in spacecraft applications like the so-called solar sails. The object of this thesis is to develop a measuring facility for analysis the acting force on thin reflective foils by solar like radiation. Furthermore, the facility will be verified by series of measurements, occurring effects will be characterized. This measuring system will be built up and operate in a vacuum chamber. A 1600W Xenon lamp with an AM0 spectrum will illuminate a 7.5 µm thick kapton foil coated with aluminum. A high precision balance measures the acting force on foil surface. In different measurement sequences foil samples are irradiated at different energy fluxes. The measured values correspond to the theoretical value of radiation pressure. Also, in the experiment appears a so far disregarded effect. Under atmosphere and still in vacuum water molecules adhere to the foil surface. These molecules desorbs due to first strike of the radiation. The momentum by desorbing molecules is much higher than the momentum of photons. This influence affects radiation pressure measurement. Therefore, relevant boundary conditions are defined in a test procedure to eliminate disturbing influences.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG 1

1.1 MOTIVATION 3
1.2 STAND DER LITERATUR 6
1.2.1 Erste grundlegende Untersuchungen und Experimente zum Strahlungsdruck 7
1.2.2 Anwendung Sonnensegeln 9
1.3 ZIELSETZUNG 12
1.4 KONZEPT 13

2. EINFÜHRUNG IN DIE THEORIE 14

2.1 LICHTSTRAHLUNG 14
2.1.1 Sonne 15
2.2 STRAHLUNGSDRUCK 17
2.2.1 Strahlungsdruck im Teilchenbild 17
2.2.2 Strahlungsdruck im Wellenbild 19
2.2.3 Strahlungsdruck experimentell 20
2.3 VAKUUMBEDINGUNGEN 22
2.3.1 Umgebungsdruck 23
2.3.2 Vakuum im Labor 24
2.4 STRAHLUNG IM VAKUUM 25
2.4.1 Radiometrische Kraft 25
2.4.2 Optische Desorption 27

3. VERSUCHSAUFBAU 29

3.1 MESSPRINZIP 29
3.2 MESSPROBEN 30
3.3 MESSEINRICHTUNG 33
3.3.1 Rezipient 34
3.3.2 Solarsimulator 35
3.3.3 Waage 36
3.4 STÖREFFEKTE 38
3.4.1 Auftrieb 38
3.4.2 Lichteinfall 39
3.4.3 Thermische Belastung 39
3.4.4 Elektrostatik 40
3.5 FEHLERABSCHÄTZUNG 41
3.6 DEFINITION EINES STANDARDMESSVERFAHRENS 44
3.6.1 Randbedingungen und Parameter 45
3.6.2 Vorbereitungen und Justage 46
3.6.3 Drift 47
3.6.4 Erstes Abdampfen 47
3.6.5 Bestrahlungszyklus 48
3.7 STANDARDARBEITSANWEISUNG (STAA) 49

4. TESTREIHEN 50

4.1 VORTESTS 50
4.2 ERSTER MESSZYKLUS M1 51
4.3 MESSREIHEN 53
4.3.1 Variation der Bestrahlungsdauer 53
4.3.2 Variation des Umgebungsdrucks 55
4.3.3 Variation der Bestrahlungsstärke 58

5. AUSWERTUNG 61

5.1 ENTWICKLUNG EINES MESSSTANDS IM HOCHVAKUUM 61
5.2 ERGEBNISSE DER TESTREIHEN 62
5.2.1 Desorption 62
5.2.2 Quantifizierung des Strahlungsdrucks 68
5.3 AUSWIRKUNGEN DER STÖREFFEKTE 71
5.3.1 Erstes Abdampfen im Weltall 71
5.3.2 Desorption nicht nur als Störeffekt 71

6. ZUSAMMENFASSUNG 73

6.1 AUSBLICK 74

LITERATURVERZEICHNIS 77

ANHANG 81

MODIFIZIERUNG DER WAAGE 81

STANDARDARBEITSANWEISUNG: QMH-RY-MTS-06-A05_V1-1-STRAHLUNGSMESSUNG 84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Darstellung eines Sonnensegels im All [DLR] 1

Abbildung 1.2: Orbit einer möglichen Sonnenpol-Mission (SPI) um die Sonne [2] 4

Abbildung 1.3: Lagrangepunkte L1 bis L5 im System Sonne/Erde [30] 4

Abbildung 1.4: Sonnensegeldemonstrator 6

Abbildung 1.5: komplett entfaltetes 20x20 m² Sonnensegel beim DLR Köln [6] 10

Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer Lichtmühle 25

Abbildung 2.2: Impulse p_{rad_o} und p_{rad_u} durch Bestrahlung der Folie in Restgasatmosphäre 26

Abbildung 3.1: Typischer Querschnitt einer Segelfolie 31

Abbildung 3.2: Segelfolienprobe / Abbildung 3.3: Elektrische Kontaktierung der Segelfolienprobe . 32

Abbildung 3.4: Mylarprobe nach Bestrahlung / Abbildung 3.5: Folienprobe aus Aluminium 32

Abbildung 3.6: Ergebnis der Reflexionsmessung 33

Abbildung 3.7: Skizze des Messaufbaus 34

Abbildung 3.8: Sonnensimulationsanlage (SSA) 35

Abbildung 3.9: Schematische Darstellung der Waage [54] 37

Abbildung 3.10: Präzisionswaage: Bedieneinheit (links) und Wägezelle (rechts) 37

Abbildung 3.11: Waagschale 38

Abbildung 3.12: Waage mit MLI-Haube auf einer Temperierplatte 39

Abbildung 3.13: Waagschale mit vergoldetem Glasrohr als thermischen Isolator 40

Abbildung 3.14: Umlenkspiegel mit Erdungslitzen 41

Abbildung 3.15: Verteilung der Bestrahlungsstärke in der Arbeitsebene 42

Abbildung 3.16: Skizze einer unebenen Folienoberfläche 43

Abbildung 3.17: Reaktion der Waage auf das erste Abdampfen der Moleküle 48

Abbildung 4.1: Masseänderung aufgrund erster Bestrahlung 50

Abbildung 4.2: Masseverlust aufgrund Beendens einer Bestrahlung 51

Abbildung 4.3: Masseänderung aufgrund Bestrahlung (M1) 52

Abbildung 4.4: Masseänderung bei unterschiedlichen Bestrahlungszeiten (M2) 54

Abbildung 4.5: Masseänderung in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck (M3, M4, M5) 56

Abbildung 4.6: 87 Messergebnisse bei p_{Grenz} = 1*10^{-6}mbar mit 1000 W/m² 58

Abbildung 4.7: Vergleich verschiedener Bestrahlungsstärken 59

Abbildung 4.8: Bestrahlung mit unterschiedlichen Bestrahlungsstärken 59

Abbildung 5.1: Masseänderung aufgrund Bestrahlung bei 0,3*10^{-6}mbar 64

Abbildung 5.2: Masseänderung aufgrund Bestrahlung bei 1,0*10^{-6}mbar 65

Abbildung 5.3: Masseänderung aufgrund Bestrahlung bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken 66

Abbildung 5.4: Masseänderung in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck 66

Abbildung 5.5: Masseänderung aufgrund Bestrahlung bei 15*10^{-6}mbar 67

Abbildung 6.1: Schematischer Messaufbau LiMes / Abbildung 6.2: LiMes [59] 75

Abbildung 7.1: Blick ins Innere der Waage 81

Abbildung 7.2: Prozessverlauf der Waagen-Konfektionierung 82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Definition der Druckbereiche 23

Tabelle 3.1: Abgeschätzte Fehler der Messgrößen 44

Tabelle 4.1: Vergleich der Massendifferenzen infolge Bestrahlung bei unterschiedlichen Drücken 56

Tabelle 4.2: Masseänderungen durch Bestrahlung (1000 W/m²) bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken 57

Tabelle 5.1: Ermittelte Strahlungsdrücke im Verhältnis zum erwarteten Strahlungsdruck 69

Tabelle 5.2: Abweichung der gemessenen von der berechneten Massendifferenz bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken 70

Nomenklatur

A	Fläche
A_{eff}	effektiv bestrahlte Fläche
$A\perp$	senkrecht bestrahlte Fläche
α	Absorptionsgrad
$\boldsymbol{B}$	magnetische Feldkomponente
B	magnetische Feldstärke
β	Winkel
c	Lichtgeschwindigkeit
δ	Dissipationsgrad
E	Energie
$\boldsymbol{E_{el}}$	elektrische Feldkomponente
E_{el}	elektrische Feldstärke
E_{desH2O}	Bindungsenergie von Wasser
ε_0	Permittivität des Vakuums
F	Kraft
Df	Kraft auf ein Stromelement
g	Schwerebeschleunigung
H	Höhe
h	plancksches Wirkungsquantum
$\boldsymbol{j}$	elektrischer Strom
j_z	induzierte Stromdichte in z-Richtung
k	Boltzmannkonstante
L_S	Sonnenintensität
Δl	(Folien-)Dicke
λ	Wellenlänge
M	molare Masse
M_r	relative molare Masse
m	Masse
m	Ruhemasse
m_1	mittlere Masse eines Teilchens
Δm	Massendifferenz
Δm_-	Masseverlust
Δm_+	Massezuwachs
μ_0	Permeabilität des Vakuums
N	Teilchenzahl
N_A	Avogadro-Konstante
n	Stoffmenge
η	Wirkungsgrad
v	Frequenz
v_A	Wandstoßrate
v_F	(Flucht-)Geschwindigkeit
$v_{o,u}$	(Flucht-)Geschwindigkeit der desorbierten Moleküle
P_S	Strahlungsdruck
P_{S_gem}	experimentell gemessener Strahlungsdruck

P_{S_rech}	berechneter Strahlungsdruck
P_W	Druck des Sonnenwindes
$\langle dP \rangle$	zeitlich gemittelter Druck
p	Impuls
p_V	(Umgebungs-)Druck
p_{min}	minimaler Umgebungsdruck der SSA
p_{Grenz}	Standardumgebungsdruck
p_h	Atmosphärendruck in Höhe h
p_0	Atmosphärendruck in Meereshöhe
p_{rad_o}	radiometrischer Impuls der Folienoberfläche
p_{rad_u}	radiometrischer Impuls der Folienunterseite
p_{radio}	radiometrischer Impuls
p_{des_o}	Impuls der Folienoberfläche infolge optischer Desorption
p_{des_u}	Impuls der Folienunterseite infolge optischer Desorption
p_{des}	(Netto-)Impuls infolge optischer Desorption
ρ_0	Dichte der Luft in Meereshöhe
ρ	Reflexionsgrad
$\rho_V(t,W)$	Degradation des Reflexionsgrads
Q_{des}	Desorptionsstrom
q_{des}	flächenspezifische Desorptionsstromdichte
R	Gaskonstante
R_S	Distanz zur Sonne
R_E	Distanz Sonne-Erde
t	Zeit
t_0	Startzeit
T	Temperatur
T_o	Temperatur der Folienoberfläche
T_u	Temperatur der Folienunterseite
τ	Transmissionsgrad
U	Energiedichte
$\langle dU \rangle$	Gesamtenergiedichte
V	Volumen
V_F	Verlustfaktor
V_0	unbekannte Verluste
V_{A_real}	Verlustfaktor der Oberflächeneigenschaft
W	Leistungsflussdichte /Bestrahlungsstärke
W_E	Solarkonstante
Δx	Abstand
dx	Richtungsableitung bezüglich x-Richtung
dy	Richtungsableitung bezüglich y-Richtung
$dydz$	Flächenelement
dz	Richtungsableitung bezüglich z-Richtung

Abkürzungsverzeichnis

RY	Institut für Raumfahrtsysteme
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
MTS	Mechanik und Thermalsysteme
ESA	European Space Agency
SPI	Sonnenpol-Mission
NASA	Aeronautics and Space Administration
ISSS	International Symposium on Solar Sailing
U3P	Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique
SSUJ	Solar Sail Union of Japan
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
AU	Astronomische Einheit
SSA	Sonnensimulationsanlage
StAA	Standardarbeitsanweisung
MLI	Multi-Layer-Insulation
LEO	Low Earth Orbit
LiMes	Lichtdruckmessstand
KOBE	Komplexe Bestrahlungseinheit

1. Einleitung

Trifft Licht auf einen Körper, übertragen die Photonen der Strahlung auf den Körper einen Impuls. Der bestrahlte Körper erfährt aufgrund des Strahlungsdrucks eine Kraftwirkung.

Die Kraftwirkung ist so gering, dass sie unter normalen Umweltbedingungen zu vernachlässigen ist. Unter speziellen Bedingungen, wie dem luftleeren Raum im Weltall, bewirken die Wärmestrahlung und der Strahlungsdruck der Sonne die Entstehung der Kometenschweife. In der Nanotechnologie wird mit Laserstrahlen der Strahlungsdruck zum Bewegen kleinster Teilchen genutzt [1].

Im freien Weltraum kann der Strahlungsdruck als ein spezieller Antrieb für Raumfahrzeuge genutzt werden. Zurzeit wird weltweit in verschiedenen Forschungseinrichtungen ein alternativer Antrieb für Raumfahrzeuge entwickelt. Dieser neuartige Antrieb wird in der Fachwelt mit *solar sailing* oder *Sonnensegeln* bezeichnet. Die technische Idee dazu ist eben so alt wie auch simpel. Dabei werden spezielle Raumfahrzeuge über einen extrem dünnen Spiegel – einer reflektierenden Folie – der Sonnenstrahlung ausgesetzt, wie in Abbildung 1.1 dargestellt. Die Photonen der solaren Strahlung üben einen Druck auf die Spiegeloberfläche aus. Das Spiegel-Raumfahrzeug-System erfährt somit einen Impuls, wodurch es gezielt fortbewegt werden kann. Diese Vision erscheint zunächst einfach, birgt jedoch große technologische Herausforderungen in sich.

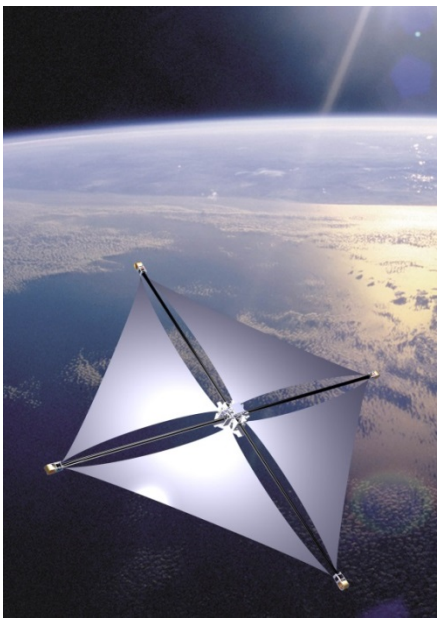

Abbildung 1.1: Darstellung eines Sonnensegels im All [DLR]

Das stetige Interesse an dieser Antriebstechnik ist durch die neuen Einsatzmöglichkeiten begründet. Die Sonnensegeltechnologie ist eine wichtige Voraussetzung für künftige Tiefraummissionen. Die Sonne dient als eine stetige, unerschöpfliche Antriebsquelle, das bietet den Vorteil, auf mitzuführenden Treibstoff verzichten zu können. Ein Sonnensegel kann in unserem Sonnensystem somit zeitlich unbegrenzt auf die Antriebsenergie der Sonne zugreifen. Auch die Startmasse wird extrem reduziert. Damit erschließt sich ein revolutionäres Einsatzpotential. Die Sonnensegler können sehr hohe Geschwindigkeiten erreichen. Des Weiteren sind die Sonnensegler nicht mehr an die speziellen Keplerbahnen gebunden. Mit der Segeltechnologie ist es zum Beispiel möglich, die Pole der Sonne zu umkreisen. Die Abhängigkeit von einem speziellen Zeitfenster für den Start eines Sonnenseglers zu interplanetaren Missionen ist auch nicht mehr gegeben.

Die Herausforderung einer Umsetzung der Idee, den Strahlungsdruck der Sonne als Antriebsmittel zu nutzen, liegt in verschiedenen Teilbereichen dieser Technologie begründet. Der maximale Strahlungsdruck, den die solaren Photonen in Erdnähe auf eine 100% reflektierende Segelfolie ausüben, ist bei idealen Bedingungen mit etwa 9 $\mu N/m^2$ sehr gering im Vergleich zu herkömmlichen Antriebsmitteln. Um eine angemessene Beschleunigung zu erreichen, müssen die Segelfolien große Ausmaße besitzen. Andererseits müssen die Sonnensegel so leicht und dünn wie möglich konstruiert werden. Weitere Schwierigkeiten stellen die Herstellung der Sonnensegel, deren raketenstartsichere Verpackung und schließlich die Entfaltung im Weltraum dar.

Die Segelfolien haben bereits direkt nach der Fertigung ein Reflexionsvermögen kleiner Eins. Durch den Konfektionsprozess der Folie zum Segel (durch Klebung, Faltung und Verpackung des Segels in eine Startkonfiguration), die anschließende Belastung durch den Start selbst und die Entfaltung des Segels im Weltraum, sind weitere Verluste des Reflexionsvermögens in Kauf zu nehmen. In diesem Zusammenhang ist es zunächst interessant, mit welchen Antriebsparametern zu Beginn der Sonnensegelkonfiguration gerechnet werden kann. Ab der Aktivierung der Konfiguration im All ist das Segel der solaren Strahlung ausgesetzt, deren ultraviolette, infrarote und korpuskularen Anteile (Elektronen, Protonen und Ionen) zu einer fortgesetzten Degradation der Segelfolie führen werden.

Das Ziel dieser Dissertation ist die quantitative Vermessung des Strahlungsdrucks auf dünne, reflektierende Folien unter Weltraumbedingungen. Der Strahlungsdruck ist abhängig von der Strahlungsintensität und dem Spektrum der Quelle, den Eigenschaften der bestrahlten Fläche (wie Größe, Reflexionsvermögen, Ausrichtung) und den Umgebungsbedingungen. Mit diesen Parametern kann der Strahlungsdruck formal berechnet werden. Dieser theoretisch ermittelte Wert ist experimentell bislang nicht genauer untersucht. Für künftige Missionen ist es jedoch notwendig den Strahlungsdruck als Antriebsmittel auf Sonnensegelfolien gezielt zu untersuchen, um unter anderem Flugbahnmodelle zu verifizieren.

Im Institut für Raumfahrtsysteme (RY) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) steht der Abteilung Mechanik und Thermalsysteme (MTS) eine Weltraumsimulationsanlage zur Verfügung. In dieser Anlage kann die elektromagnetische Strahlung der Sonne, mittels eines Solarsimulators mit verschiedenen Intensitäten, im Hochvakuum simuliert werden. Zur Analyse der Wirkung einer solaren Reflexion von unterschiedlichen Segelfolienproben wird eine Messeinrichtung entwickelt. Der Strahlungsdruck kann dabei mit einer hochsensiblen Präzisionswaage ermittelt werden. Diese Untersuchungen gelten als Voraussetzung der technischen Umsetzung des Sonnensegelantriebs und sind Bestandteil dieser Dissertation.

1.1 Motivation

Die Notwendigkeit einer quantitativen Vermessung des Strahlungsdrucks entsteht aus der Entwicklung der Sonnensegelantriebstechnologie. Die Idee, Raumfahrzeuge über den Strahlungsdruck der Sonne anzutreiben, taucht vor etwas über einem Jahrhundert in der Fachliteratur auf. Diese Antriebsart ist vom physikalischen Prinzip recht anschaulich und bietet viele Vorteile gegenüber konventionellen Raumfahrtantrieben. Eine detaillierte Betrachtung der Auswirkung des Strahlungsdrucks auf Sonnensegelfolien ist für die Anwendung dieser Antriebstechnologie unabdingbar.

Die Kraft auf ein Sonnensegel ist zwar gering, aber kontinuierlich und gratis verfügbar. In einem vereinfachten Gedankenexperiment wird ein Quadratmeter großes Sonnensegel in Erdnähe für 10^6 Sekunden (entspricht etwa 11½ Tage) von der Sonne bestrahlt. Nach dieser Zeit hat das Segel eine Geschwindigkeit von zehn Metern pro Sekunde. Die Bestrahlungsstärke ändert sich quadratisch mit dem Abstand der Sonne. Nähert sich das Sonnensegel der Sonne, können Geschwindigkeiten bis zu 100.000 Metern pro Sekunde erreicht werden. Damit sind Missionen jenseits unseres Sonnensystems realistisch. Eine Beschleunigung kann zwar nur in Sonnennähe aufgebaut werden und in großer Entfernung von der Sonne kann nicht mehr beliebig manövriert werden. Dennoch können große Geschwindigkeiten und lange Betriebszeiten erreicht werden. Diese führen dazu, dass auf vergleichbaren missionstypischen Zeitskalen mit einem Sonnensegelantrieb deutlich höhere kinetische Energien auf das Raumfahrzeug übertragen werden können, als es mit einem treibstoffbasierten Antrieb möglich wäre. Ferner haben die Sonnensegler die Möglichkeit die Kepler Orbits zu verlassen. Dadurch können beispielsweise Orbits um die Sonnenpole geflogen werden. Eine Sonnenpolmission ist denkbar, um die globale Struktur und Dynamik der Sonnenkorona zu untersuchen [2]. Eine Flugbahnsimulation ist in Abbildung 1.2 veranschaulicht.

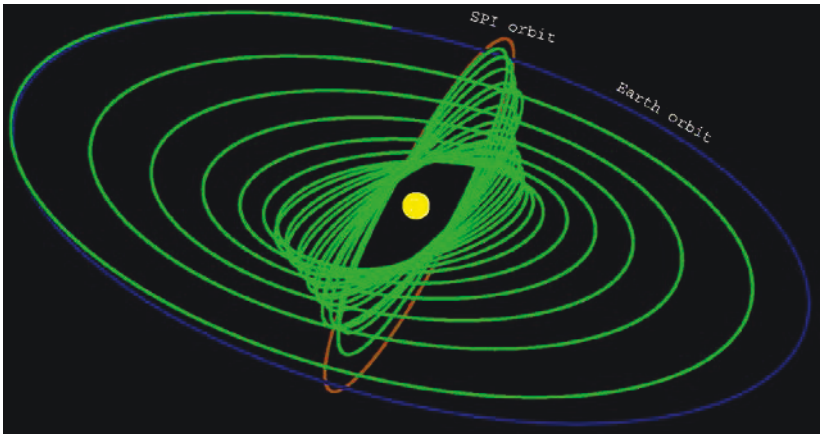

Abbildung 1.2: Orbit einer möglichen Sonnenpol-Mission (SPI) um die Sonne [2]

Eine weitere spezielle Mission kann die Platzierung und Stabilisierung eines Satelliten durch ein Sonnensegel in einem Lagrangepunkt sein, zunächst des Systems Erde/Mond und auch im System Sonne/Erde. Die einzelnen Lagrangepunkte sind in folgender Abbildung 1.3 dargestellt.

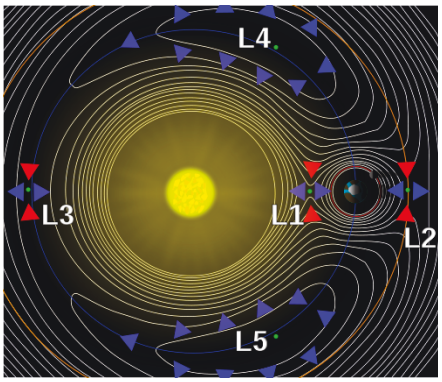

Abbildung 1.3: Lagrangepunkte L1 bis L5 im System Sonne/Erde [30]

Die Lagrangepunkte sind natürliche Gleichgewichtspunkte, in denen sich die Gravitations- und Zentrifugalkräfte gegenseitig aufheben. Sie sind sehr gut geeignet, um lang andauernde astrophysikalische und astronomische Beobachtungen durchzuführen. Von einem Lagrangepunkt (L1) aus ist eine kontinuierliche Beobachtung der Sonne möglich, zum Beispiel ein Frühwarnsystem für Sonnenstürme. Ein weiterer Lagrangepunkt (L2) eignet sich besonders zur vom Sonnenlicht ungestörten Beobachtung des tiefen Weltraums, beispielsweise zum Asteroidenmonitoring, für die Astrometrie oder die Langzeitbeobachtung von Sternen und der äußeren Planeten [3].

Die Standardmodelle eines Sonnenseglers, welche zurzeit für die Flugbahnberechnung verwendet werden, gehen von einem idealisierten Sonnensegel aus. Die Sonnensegelleistung ist im Wesentlichen durch vier Faktoren bestimmt: die Flächenmasse des Segels, die Segelflächengeometrie, die optischen sowie die mechanischen Eigenschaften der Segelfolie [4]. Die einfachsten Modelle zum Missionsdesign gehen von einer idealen Reflexion an einer ebenen Fläche aus. Eine

leichte Optimierung der Modelle entsteht durch die Annahme der realen Reflexion mittels eines Reflexionskoeffizienten. Diese Annahme ist für einige Missionen eine gute erste Annäherung. Für andere Missionen ist die Reduzierung der Antriebsleistung um diesen Faktor nicht ausreichend [5]. Einige Modelle gehen mittlerweile von 5% bis 20% Degradation aus. Mit dieser Annahme ergibt sich eine erhebliche Erhöhung der Zeitdauer einer Mission, welches zu erheblichen Problemen führen kann, zum Beispiel bei einem Mars-Rendezvous [6]. Neueste Modelle beziehen die Unebenheit der Segelfolienfläche mit in die Berechnung ein. Eine Wölbung der Segelfläche hat sowohl Auswirkungen auf den Betrag als auch auf die Richtung der Antriebskraft [7]. Die optischen und mechanischen Eigenschaften der Sonnensegelfolie gilt es, für die Berechnung einer präzisen Navigation zu untersuchen. Dabei steht die Veränderlichkeit der Materialeigenschaften im Laufe einer möglichen Sonnensegelmission besonders im Fokus.

Die Sonnensegelfolie besteht aus metallisiertem Polyimid. Die optischen Eigenschaften dieser Folie ändern sich im Weltall durch die speziellen Umweltbedingungen, denen das Material ausgesetzt ist. Im Vakuum des Weltalls wirken die elektromagnetische Strahlung sowie die Teilchenstrahlung (Elektronen, Protonen und Ionen) auf die Folien ein. Dieser Degradationseffekt ist noch nicht systematisch untersucht und bestimmt worden. In Europa hat sich 2006 im Rahmen der *Gossamer Workshops* eine Arbeitsgruppe (*Solar Sail Degradation Model Working Group*) zur Untersuchung der optischen Degradation gebildet [8]. Auch in Amerika ist am NASA Marshall Space Flight Center eine Arbeitsgruppe (*Environmental Effects Group*) gegründet worden [4]. Erste Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich auf einer mit Aluminium beschichteten Folienoberfläche, durch die Bestrahlung mit Ionen, Wasserstoffbläschen bilden können [9]. Untersuchungen zum realen Degradationsverhalten im Weltall stehen noch aus.

Die Konfektionierung einer Folie zum Sonnensegel nimmt einen weiteren Einfluss auf die optischen Eigenschaften der Folie. Für die Endfertigung sind verschiedene mechanische Prozesse wie Klebungen von Folienbahnen oder die Faltung und Verpackung des Sonnensegels für den Transport notwendig. Diese Fertigungsprozesse reduzieren das Reflexionsvermögen der Folie noch bevor das Segel im Weltall der elektromagnetischen Strahlung ausgesetzt ist und erzeugen somit ebenfalls eine Degradation. Die Folgen der Konfektionierung und Verstauung in einen Transportbehälter sind in Abbildung 1.4 deutlich zu erkennen. Die Folie weist starke Falten und Knitter auf.

Abbildung 1.4: Sonnensegeldemonstrator

In dieser Dissertation wird eine Messeinrichtung entwickelt, welche die Kraft auf eine Sonnensegelprobe im Hochvakuum direkt messen kann. Der Strahlungsdruck kann auf unterschiedlichen Folienproben bestimmt werden. Dabei wird die darauf wirkende Kraft einschließlich der Verluste infolge der oben beschriebenen Degradationen gemessen.
Diese real gemessenen Werte können wieder ein Beitrag zur Validierung der Flugbahnsimulationen sein. Die optischen Eigenschaften der Segelfolien müssen sich nicht länger nur auf Annahmen beziehen, sie können mit den experimentellen Werten verifiziert werden. Darüber hinaus können mit der Messeinrichtung unterschiedliche Folienproben vermessen und verglichen werden.

1.2 Stand der Literatur

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die Idee des Sonnensegels von verschiedenen Physikern theoretisch untersucht. Im letzten Jahrhundert haben sich viele Organisationen gegründet und zusammengeschlossen, die sich wissenschaftlich mit dem Sonnensegeln beschäftigen und den Wissensstand vorantreiben. Seit 2007 finden regelmäßig internationale Kongresse zu dem Thema statt. Die letzte Konferenz, das vierte *International Symposium on Solar Sailing (ISSS)* fand Anfang 2017 in Kyoto, Japan statt.

Ebenfalls zu Beginn des 20. Jahrhunderts entstanden weltweit Veröffentlichungen zu den ersten experimentellen Untersuchungen des Strahlungsdrucks. Der Stand der damaligen Technik war für die hochsensible Strahlungsdruckmessung noch nicht ausgereift. Daher blieb die Thematik über einige Jahrzehnte unbeachtet. Die Weiterentwicklung der Vakuum- und Messtechnik belebte diesen Forschungsbereich wieder. Und auch andere Anwendungen des Strahlungsdrucks, wie zum Beispiel Nanopinzetten, treten in Erscheinung. Der Strahlungsdruck wird in diesem Fall mittels Laser ausgeübt [1].

1.2.1 Erste grundlegende Untersuchungen und Experimente zum Strahlungsdruck

Die erste wissenschaftliche Aufzeichnung zu diesem Thema schrieb J. Kepler. Er veröffentlichte 1619 „De Cometis“, wobei er drei Kometen aus dem Jahre 1618 beschrieb [10]. Seine Hypothese, dass der Druck der Sonnenstrahlung für die Ausrichtung der Kometenschweife verantwortlich sei, bestätigte sich etwa 250 Jahre später.

I. Newton mutmaßte 1687, dass Licht Druck auf Materie ausübt [11]. Im 18. Jahrhundert beschäftigten sich auch L. Euler und J. J. De Mairan zusammen mit C. Du Fay mit den Druckkräften der Sonnenstrahlung. De Mairan und Du Fay haben einige Versuche durchgeführt, um ihre Vermutungen experimentell zu überprüfen [12]. In den Experimenten überlagerte die Erwärmung der umgebenden Luft die Wirkung des Strahlungsdrucks, somit konnten sie keinen Nachweis erzielen. 1825 hat der Physiker A. Fresnel dazu ebenfalls Experimente durchgeführt und traf auf dieselben Schwierigkeiten [13]. Ein halbes Jahrhundert später traf auch W. Crookes bei seinen Untersuchungen auf diesen störenden Effekt. Nach weiteren eingehenden Untersuchungen entdeckte er die radiometrischen Kräfte [14]. Zu dieser Zeit hat J. C. Maxwell im Rahmen seiner Arbeiten zum Elektromagnetismus den Betrag des Strahlungsdrucks vorhergesagt. 1873 hat Maxwell die Existenz des Strahlungsdrucks theoretisch nachgewiesen. Parallel dazu leitete A. Bartoli 1876 die Existenz des Strahlungsdrucks aus thermodynamischen Betrachtungen ab. Zu dieser Zeit wurde der Strahlungsdruck Maxwell-Bartolischer Druck genannt [31]. Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts scheiterten alle Versuche den von Maxwell und Bartoli beschriebenen Strahlungsdruck nachzuweisen. Die experimentelle Bestätigung der äußerst geringen Druckkraft der Photonen bedarf eines sensiblen Messaufbaus mit fortschrittlicher Vakuumtechnik. P. N. Lebedew führte 1900 die ersten experimentellen Untersuchungen zum Strahlungsdruck in einer speziellen Messeinrichtung unter Vakuum durch [15]. Er wollte experimentell nachweisen, dass Lichtstrahlen Kräfte (unabhängig von konvektiven und radiometrischen Kräften) ausüben und dass diese den von Maxwell und Bartoli berechneten Druckkräften entsprechen. Lebedew bestimmte den Strahlungsdruck im Vakuum mittels eines Torsionspendels. Dieser Strahlungsdruck übersteigt den von Maxwell berechneten Wert um etwa 20%. Die Amerikaner E. F. Nichols und G. F. Hull arbeiteten etwa zur selben Zeit an dem experimentellen Nachweis des Strahlungsdrucks. Ihre Ergebnisse weichen um etwa 10% von dem zu erwartenden Druck nach Maxwell ab [16]. Aus Zweifel an Lebedews und Nichols Ergebnissen führte W. Gerlach 1923 eine weitere Messung des Strahlungsdrucks durch. In verschiedenen Experimenten wies Gerlach - bei den von Lebedew verwendeten Drücken - an blanken Metallflächen noch einen beträchtlichen Radiometereffekt nach. „Die klassischen Versuche von Lebedew führten mit den zu seiner Zeit zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln zwar zum Nachweis des Strahlungsdrucks, jedoch kann das zahlenmäßige Ergebnis seiner Messungen mit einer Abweichung von 20% kaum als Bestätigung der Theorie

aufgefasst werden. Nichols und Hull führten ihre Experimente bei höheren Drücken durch, jedoch scheint die Genauigkeit dieser Methode mehr durch das mit der Theorie vollkommen übereinstimmende Ergebnis als durch innere Überzeugungskraft der ausgeführten Versuche erwiesen.“ (Gerlach 1923) Aus seinem Zweifel heraus führte Gerlach mit A. Golsen eine Neubestimmung des Strahlungsdrucks durch, mit dem besonderen Augenmerk auf die störend wirkende Radiometerkraft. Sie nahmen zunächst von dem Messsystem Radiometerkurven als Funktion des Drucks auf. Als Messgerät diente ebenfalls ein Torsionspendel. Die Messkammer wurde soweit evakuiert, bis ein vom Druck unabhängiger Restausschlag des Pendels verblieb, welcher allein durch die Wirkung des Strahlungsdrucks zustande gekommen sein kann [17].

Ausgehend von den grundlegenden, ersten Untersuchungen und Experimenten und vor dem Hintergrund der potentiellen Anwendung als Sonnensegelantrieb folgten bald erste Experimente mit Blick auf Weltraumanwendungen. Durch die Entwicklung der Vakuumtechnik ist es nun möglich, den Strahlungsdruck im Detail zu untersuchen. Drücke im Hochvakuumbereich, also kleiner als 10^{-7} mbar, sind heutzutage technisch einfach zu erreichen. Der technologische Fortschritt macht sich ebenfalls in der Messtechnik bemerkbar. Im Marshall Space Flight Center der NASA führten 1999 P. A. Gray und sein Team Untersuchungen an reflektierender Folie in einer Vakuumkammer durch. Die Ergebnisse zeigten einen Strahlungsdruck, der in dem Bereich des theoretisch ermittelten Werts lag [18]. Dies war der erste aktuelle Nachweis des Strahlungsdrucks auf eine reflektierende Folie. Die Folie war eine reine Aluminiumfolie. Die Untersuchung einer realen Sonnensegelfolie steht weiterhin aus.

Aufgrund der mangelnden Daten zur Strahlungsdruckmessung auf reflektierende Folien hat das DLR 2003 im Zuge des *SolarSail* Projekts die Untersuchung der Reflexion solarer Strahlung an dünnen Folien unter Weltraumbedingungen begonnen. Die zu vermessende Folienprobe wurde an einem Hebelarm befestigt und im Vakuum mit einem Solarsimulator (1000 Watt Xenonlampe) bestrahlt. Der Strahlungsdruck lenkt das Pendel aus seiner Ruhelage. Über die Auslenkung des Pendels konnte die Kraft auf die Folienfläche berechnet werden. Der Messaufbau wurde konditioniert und getestet. In den Experimenten wurden verschiedene Störeffekte entdeckt und zum Teil beseitigt. Mit der Messeinrichtung ist die Kraftwirkung des Strahlungsdrucks nachgewiesen worden [19]. Für eine quantitative Vermessung des Strahlungsdrucks musste ein neues Messprinzip systematisch, experimentell entwickelt werden. Aus diesem Bedarf heraus folgte die Erwählung einer Präzisionswaage, welche die Photonen wiegt, als Messmittel und Kernelement dieser Dissertation. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Strahlungsdruckmessung mittels Torsionspendel sowie der Ergebnisse einer Literaturrecherche entsteht ein neuer Entwicklungsprozess

1.2.2 Anwendung Sonnensegeln

Um die Zeit der Entstehung theoretischer und experimenteller Nachweise des Strahlungsdrucks veröffentlichten einige Science-Fiction Autoren, zum Beispiel 1889 die Franzosen C. Faure und H. Graffigny, die Idee eines Raumfahrzeugs, welches mit Sonnenstrahlung über Spiegel angetrieben wurde [12]. Das Thema wurde populär.

Um 1920 haben K. Tsiolkovsky und sein Mitarbeiter F. Tsander ebenfalls Ideen zu den Sonnenseglern veröffentlicht. Sie beschrieben riesige hauchdünne Spiegel, welche den Lichtdruck der Sonne nutzten, um kosmische Geschwindigkeiten zu erlangen [20]. Nach den wissenschaftlichen Veröffentlichungen von Tsiolkovsky und Tsander blieb die Idee des Sonnensegelns über 30 Jahre lang unberührt. Erst um 1950 wurde das Konzept wieder aufgegriffen. Der amerikanische Raumfahrtingenieur C. Wiley beschrieb 1951 in einem Artikel „*Astounding Science Fiction*“ einen möglichen Sonnensegler [21]. Er war sehr optimistisch und erklärte bereits, dass die Sonnensegeltechnologie für interplanetare Missionen dem herkömmlichen Raketenantrieb vorzuziehen sei. 1958 erschien die erste westliche technische Veröffentlichung zum Thema Sonnensegeln von R. Garwin in dem Journal *Jet Propulsion* [22]. Garwin, ein Mitarbeiter der Columbia Universität, prägte damit den Begriff *solar sailing*. Wiley und Garwin erkannten die Einfachheit und die besonderen Eigenschaften des Sonnensegelns: kein mitzuführender Treibstoff wird benötigt und eine kontinuierliche Beschleunigung findet statt. Aus der nun losgetretenen Auseinandersetzung mit dem Thema folgten bis in die frühen 1960er weitere Untersuchungen bezüglich möglicher Bahnen eines Sonnenseglers. Einfache Vergleiche der Sonnensegeltechnik mit chemischen Antrieben und Ionenantrieben zeigten, dass das Sonnensegeln den unterschiedlichsten Anwendungen prinzipiell gewachsen ist. Diese frühen Studien untersuchten den Nutzen und die grundlegenden Probleme des Sonnensegelns. Für detaillierte Analysen fehlte es an einer konkreten Mission. Die Entwicklung des Space Shuttles ermöglichte es, große Nutzlasten in den Erdorbit zu transportieren. Außerdem deutete sich durch die Weiterentwicklung von im Weltraum einsetzbaren Leichtbaustrukturen und dünnen beschichteten Folien an, so dass eine Sonnensegelmission in Erwägung gezogen werden konnte [32]. 1973 startete die Weltraumsonde *Mariner 10* um die Planeten Merkur und Venus zu erkunden. *Mariner 10* nutzte den Strahlungsdruck der Sonne auf die Solarkollektoren für die Fluglagenkontrolle während des Fluges. Obwohl *Mariner 10* keine Sonnensegelmission war, demonstrierte sie das Prinzip des Sonnensegelns [23]. In Europa gründete sich wegen eines geplanten Mondrennens 1981 die *Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique* (U3P). Die U3P hatte ebenso, wie die ein Jahr später gegründete *Solar Sail Union of Japan*, das Ziel, die Sonnensegeltechnologie voranzubringen [35]. In den 1990ern fanden verschiedene internationale Workshops zur Anwendung der Sonnensegeltechnologie statt. Außerdem stieg die Zahl der Veröffentlichungen durch die Nutzungsmöglichkeiten des Internets. Neben diesen Fortschritten kam es zur Entwicklung und Flugtests

einiger Schlüsseltechnologien für zukünftige Anwendungen. Im Bereich der massearmen und leistungsstarken Raumfahrzeuge gab es viele Fortschritte. Diese positive Entwicklung wurde durch die Miniaturisierung von Elektronik vorangetrieben. Das Design künftiger Sonnensegler wurde bedingt durch die Weiterentwicklung der Raumfahrzeuge. Ein Sonnensegel musste nicht mehr als gewaltige, unhandliche Struktur betrachtet werden. Als erstes Fachbuch zu dieser Thematik erschien 1999: *„Solar Sailing -Technology, Dynamics and Mission Applications“* von C. McInnes [12]. Im selben Jahr demonstrierte das DLR die erfolgreiche Bodenentfaltung eines 20 x 20 m² Segels, wie in Abbildung 1.5 zu erkennen ist.

Abbildung 1.5: komplett entfaltetes 20x20 m² Sonnensegel beim DLR Köln [6]

Entfaltet wurde ein Paket von 60 x 60 x 65 cm³ mit einer Gesamtmasse von etwa 35 Kilogramm. Das Segel bestand aus vier dreieckigen Foliensegmenten. Die Folie hatte als Trägermaterial einen Plastikfilm und war mit Aluminium (0,1 Mikrometer) beschichtet. Die Dicke der Folie betrug zwischen vier und zwölf Mikrometer. Die Entfaltung fand unter „normalen“ Umgebungsbedingungen mit einer teilweisen Gravitationskompensation statt. Vier ultraleichte Kohlefasermasten (mit einer spezifischen Masse von 100 g/m) spannten die Segel auf. Die Masten bestanden aus zwei Schalen, die an den Kanten zu einem Zylinder zusammengefügt wurden. Dieser Zylinder wurde flach gedrückt, konnte aufgerollt und in der Zentraleinheit verstaut werden. Von dort aus wurden die Masten automatisch über einen kleinen Motor entfaltet [6].

Anfang 2001 planten die *Planetary Society* und *Cosmos Studios* die *Cosmos 1* Sonnensegelmission. Dies sollte die erste Anwendung des Sonnensegelantriebs werden. Dieses Projekt hatte jedoch mit vielen Problemen zu kämpfen. Der Teststart wurde einige Male unter anderem wegen Störungen beim Entfaltungsprozess verschoben. Mitte 2001 wurde ein Vortest für *Cosmos 1* erfolgreich durchgeführt, jedoch konnte das Segel nicht entfaltet werden. Daraus folgte die Entwicklung eines

neuen Segels. Weitere Entwicklungsschwierigkeiten verzögerten den Starttermin der Mission. Der endgültige Start im Juni 2005 war wegen eines Fehlstarts auch gleichzeitig das Ende dieser Sonnensegelmission. Die Mission gilt dennoch als Technologievortrieb, da ein Sonnensegler in Zusammenarbeit zwischen Raumfahrtbehörden und Privatunternehmen entwickelt, getestet, gebaut und gestartet wurde [24]. Im Jahre 2004 entfaltete die NASA ein 10 m² großes Sonnensegel erfolgreich in einer Vakuumkammer [25]. Die Japaner entfalteten gleich zwei Sonnensegel mit unterschiedlichem Design von einer Höhenforschungsrakete in einer Höhe von rund 120 km und 170 km über der Erde. Die Segel drangen nicht in den Weltraum vor. Dies war somit noch keine Demonstration eines frei fliegenden Sonnensegels, dennoch ein entscheidendes Ereignis zur Entwicklung dieser Technologie [26].

Nach wie vor fehlten für die komplexen Umgebungsbedingungen einer realen Mission die Nachweise des sicheren Transports eines gepackten Segelsystems zu einem geeigneten Orbit, für eine erfolgreiche Entfaltung und für die erforderliche Manövrierbarkeit. Die ESA und das DLR initiierten daher 2009 gemeinsam das Projekt *Gossamer*, welches auf der Technologiestudie *GEOSAIL* basiert [40] und das *SolarSail* Projekt ablöste. Das Ziel des Projekts ist die stufenweise Entwicklung eines Sonnensegeldemonstrators, mit einem Sonnensegel einer Größe von zunächst 5 x 5 m² gefolgt von 20 x 20 m² bis hin zu 50 x 50 m² [41].

Weitere Projekte der NASA, wie *NanoSail-D* und *LightSail* sowie das *IKAROS* Projekt der japanischen Weltraumorganisation JAXA führten die Segeltechnologie weltweit voran [27]. Die JAXA hat im Sommer 2010 die erste echte Sonnensegel-demonstration präsentiert. Der 14 x14 m² große In-Orbit-Demonstrator *IKAROS* wurde in die Umlaufbahn transportiert. Die Sonnensegel wurden durch Rotation der Raumsonde mittels der Fliehkräfte erfolgreich entfaltet. Die Sonde passierte wie geplant die Venus. *IKAROS* beschleunigte aufgrund des Strahlungsdrucks dabei während ein halbes Jahres auf eine Geschwindigkeit von 100 m/s [28]. Im Januar 2011 brachte die NASA mit leichter Verspätung den *NanoSail-D2* in die Erdumlaufbahn und entfaltete erfolgreich ein 9,3 m² großes Segel [29].

2013 fand in Glasgow das dritte *International Symposium on Solar Sailing ISSS* statt. Unter anderem wurden die neusten Analysen der Messdaten von *IKAROS* vorgestellt. Nach den nummerischen Simulationen erwarteten die Japaner, dass sich die Segelfolien nach dem Aufspannen verformen -von der Sonne weg. Die Kameras zeigten jedoch eine entgegengesetzte Verformung -in Richtung Sonne. Die Japaner vermuteten, dieser Effekt läge an einer höheren Biegefestigkeit als angenommen [50].

Die *Planetery Society* arbeitet mittlerweile ebenfalls an einem skalierbaren Sonnensegeldemonstrator. Das erste Modell mit einem 32 m² großen Segel wurde 2015 erfolgreich gestartet und im All entfaltet. Eine größere Variante soll als *LightSail 2* demnächst folgen [51]. Das *Gossamer* Projekt des DLR und der ESA ist

2016 aus programmatischen Gründen in das Projekt *GoSolAr* überführt worden. Dabei liegt das Entwicklungsziel nicht mehr nur in der Demonstration und Nutzung des Strahlungsdrucks als Antriebsmöglichkeit. Die großen Folienstrukturen werden nunmehr mit sehr dünnen Photovoltaikelementen beschichten. Mit diesen Dünnfilm-photovoltaikfolien ermöglichen die geplanten Strukturen die Realisierung ultraleichter, großflächiger Solarenergiegeneratoren, die gegenüber herkömmlichen Solarpanelen eine um ein Vielfaches höhere Leistung pro Kilogramm Strukturmasse liefern können. Damit können gegenüber herkömmlichen Anwendungen die Startgewichte von Raumfahrzeugen signifikant reduziert werden. Raumfahrt-anwendungen mit hohem, elektrischem Leistungsbedarf, die bisher an den zu großen Massen konventioneller Solarenergiegeneratoren scheiterten, werden durch die neuartige Technologie realisierbar. Die Dünnfilmphotovoltaiksegel ermöglichen in Kombination mit dem Sonnensegelkonzept auch eine massenminimierte Erzeugung von elektrischer Energie an Bord eines Sonnenseglers. Dies ermöglicht langfristig auch, solarenergiebasierte elektrische Antriebe für hybride Antriebslösungen als Konzepte in Betracht zu ziehen [48].

Im Januar 2017 fand das vierte *International Symposium on Solar Sailing ISSS* in Kyoto statt. Bei dieser Konferenz wurden die jüngsten Forschungsergebnisse und der Stand der Technik vorgestellt. Unter anderem wurde die Folgemission der *IKAROS* vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein sogenanntes *Solar Power Sail*, welches ebenfalls über einen zusätzlichen, elektrischen Antrieb verfügt. Als mögliche Mission soll dieser Hybrid zu einem Asteroiden „segeln“, um diesen zu untersuchen.

1.3 Zielsetzung

Diese Dissertation untersucht die Auswirkung des Strahlungsdrucks auf reflektierende Folien unter Weltraumbedingungen. Sie gliedert sich in zwei Teile. Der erste technische Teil beschreibt die Entwicklung eines Messstands im Hochvakuum. Die entwickelte Messeinrichtung hat den Zweck, den Strahlungsdruck quantitativ zu bestimmen, welcher die Strahlung einer Lichtquelle mit einem approximierten solaren Spektrum auf die reflektierenden Folien ausübt.

Im zweiten Teil wird der Messstand durch verschiedene Messungen verifiziert. Dabei werden auftretende (Stör-)Effekte charakterisiert. Einige der Effekte stellen sich als technische oder physikalische Störungen heraus, welche die sensible Strahlungsdruckmessung beeinträchtigen. Diese störenden Einflüsse sind im Rahmen der technischen Möglichkeiten weitestgehend reduziert, so dass sie für die Strahlungsdruckmessung zu vernachlässigen sind. Andere Effekte, wie die Wirkung der optischen Desorption oder das erste Abdampfen der Probenoberfläche, gilt es bei Modellberechnungen von Sonnensegelmissionen zu berücksichtigen.

Im Zuge der Entwicklung der Messeinrichtung werden bereits Folienproben einer Bestrahlung ausgesetzt. Die Analyse der Reaktion der Segelfolie auf Bestrahlung ist ebenfalls eines der primären Ziele. Verschiedene Parameter wie die

Bestrahlungsdauer, die Intensität der Strahlung sowie der Umgebungsdruck werden hierbei variiert.

Der zweite Teil dieser Dissertation beinhaltet die Entwicklung eines standardisierten Strahlungsdruckmessverfahrens. Durch ein Standardmessverfahren können verschiedene Segelfolien untersucht und die Ergebnisse gegenübergestellt werden.

Mit dieser Dissertation wird die Grundlage für eine Charakterisierung von realen Sonnensegeln geschaffen. Die wirkende Kraft auf eine Folienprobe kann mit der Messeinrichtung direkt bestimmt werden. Die Verluste, welche durch die Degradation der Folien entstehen, werden ebenso gemessen. Die aus den Messungen ermittelten Daten können für künftige Sonnensegelmissionen zur Verifizierung von Modellberechnungen herangezogen werden.

1.4 Konzept

In der bereits erfolgten Einführung in die Strahlungsdruckthematik im Hinblick auf die Sonnensegelantriebstechnik, wird ein Gesamtüberblick über das Thema gegeben und die Durchführung dieser Dissertation begründet. Kapitel zwei führt in die theoretischen Aspekte dieser Dissertation ein. Die physikalischen Grundlagen des Strahlungsdrucks und seine Abhängigkeit von den Vakuumbedingungen werden in diesem Abschnitt erläutert. Der Messaufbau wird im dritten Kapitel beschrieben. Zunächst wird das Messprinzip vorgestellt. Die einzelnen Komponenten der Messeinrichtung, die Folienprobe sowie die Messeinrichtung insgesamt werden dargestellt und deren Funktion erläutert. Die physikalischen Effekte, die für die Entwicklung des Messaufbaus von Bedeutung sind, werden detailliert untersucht. Im Zuge der Arbeiten zum Aufbau der Messeinrichtung wird ein Standardmessverfahren für die Vermessung des Strahlungsdrucks auf Segelfolienproben entwickelt. Die Definition dieses Standardmessverfahrens erfolgt ebenfalls in diesem Abschnitt. Im vierten Kapitel werden die verschiedenen Testreihen dargestellt. Die gemessenen Werte werden veranschaulicht und detailliert beschrieben. Die Parameter wie Bestrahlungsdauer, Umgebungsdruck und Bestrahlungsstärke werden in den unterschiedlichen Testreihen variiert. Die Ergebnisse der Bestrahlungen bei verschiedenen Parametern werden miteinander verglichen und im fünften Kapitel interpretiert und diskutiert. Die aus der Strahlungsdruckmessung ermittelten Störeinflüsse, deren Auswirkung und Lösungsvorschläge im Hinblick auf zukünftige Sonnensegelmissionen werden beschrieben. Das sechste Kapitel fasst die wesentlichen Schlussfolgerungen der Entwicklung der Messeinrichtung und die Ergebnisse der Strahlungsdruckmessung zusammen. Überdies werden in einem Ausblick weiterführende Untersuchungen erörtert sowie Ideen für künftige Forschungstätigkeiten im Bereich der Strahlungsdruckmessung vorgeschlagen.

2. Einführung in die Theorie

Die Photonen der Sonne übertragen im Weltraum einen Impuls auf Flächen. Diese Flächen können sowohl Planeten, Monde und Satelliten sein als auch eine dünne, reflektierende Oberfläche. In diesem Abschnitt wird die Theorie zur Vermessung des Strahlungsdrucks zunächst über die Eigenschaften von Lichtstrahlung und speziell von der solaren Strahlung betrachtet. Der Strahlungsdruck wird allgemein im Wellen- und im Teilchenbild hergeleitet.

Der Impuls der solaren Photonen ist gering im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben von Raumfahrzeugen. In der Erdatmosphäre wird die Kraftwirkung durch die Reibung mit den umgebenden Molekülen gebremst. Deshalb werden auf der Erde Untersuchungen zum Strahlungsdruck unter Weltraumbedingungen in speziellen Vakuumkammern durchgeführt. Die physikalischen Eigenschaften der Vakuumumgebung werden ebenfalls in diesem Abschnitt erörtert.

Am Ende dieses Kapitels werden die Effekte betrachtet, welche sich aus dem Zusammenwirken der Strahlung und den Vakuumbedingungen ergeben. Die Bestrahlung einer Oberfläche im Vakuum bewirkt unter anderem die radiometrische Kraft mit der sogenannte Lichtmühlen angetrieben werden. Die Kraft, die der Strahlungsdruck auf eine Folienoberfläche bewirkt, ist wesentlich geringer als die radiometrische Kraft. Um die Überlagerung solch störender Kräfte zu vermeiden, sind die Auswirkungen hier detailliert untersucht und beschrieben.

2.1 Lichtstrahlung

Die Strahlung eines leuchtenden Punktes kann zum einen als eine elektromagnetische Kugelwelle, die von diesem Punkt ausgeht, betrachtet werden. Zum anderen kann Lichtstrahlung auch durch ein Bündel von Strahlen, welche senkrecht auf den Wellenfronten stehen, dargestellt werden. Von seiner Quelle aus verläuft ein Lichtstrahl, solange bis seine Ausbreitung durch ein Hindernis gestört wird [33]. Der Lichtstrahl wiederum kann als ein Teilchenstrom von Photonen betrachtet werden. Ein Photon ist ein Energiepaket der Größe $h\nu$ mit dem Planckschen Wirkungsquantum h und der Lichtfrequenz ν. Photonen sind die kleinsten Energieeinheiten des Lichts. Ein Photon ist ständig in Bewegung, im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit c. Photonen besitzen keine Ruhemasse, bei Lichtgeschwindigkeit nimmt die Masse m eines Photons einen endlichen Wert an, welcher seiner Energie E entspricht.

$$E = h\nu = mc^2 . \tag{2.1}$$

Photonen wechselwirken mit anderen Teilchen durch Absorption und Reflexion. Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenze zweier unterschiedlicher Medien, wird der Strahl

teilweise oder vollständig reflektiert. An glatten Oberflächen findet eine spiegelnde, gerichtete Reflexion statt. In diesem Fall ist die Rauheit der Oberfläche klein gegenüber der Wellenlänge der eintreffenden Strahlung. Bei einer großen Rauheitsstruktur relativ zur Wellenlänge wird die Strahlung diffus gestreut. In diesem Fall spricht man von diffuser Reflexion. Die Energie der einfallenden Welle wird nur zum Teil reflektiert. Der restliche Anteil breitet sich im Medium weiter aus und wird dabei ganz oder teilweise absorbiert. Bei idealen Medien kann unter bestimmten Einstrahlbedingungen der Grenzfall der vollständigen Reflexion auftreten. In der Praxis tritt dieser Fall nicht auf, da immer ein Teil der Strahlung durch Absorption verloren geht [49].

Bei der Reflexion von Strahlung treten immer Energieverluste der reflektierten gegenüber der einfallenden Strahlung in Form von Absorption und Transmission auf. Der Reflexionsgrad ρ, das Verhältnis der Intensität von einfallender Strahlung zu reflektierter Strahlung, ist ein Maß für die Reflexion der Strahlung. Der Absorptionsgrad α, das Maß für die absorbierte Intensität, und der Reflexionsgrad ρ ergeben in der Summe eins, solange die Transmission vernachlässigbar ist.

$$\rho + \alpha = 1 . \tag{2.2}$$

Der Absorptionsgrad α setzt sich aus dem Transmissionsgrad τ und dem Dissipationsgrad δ zusammen:

$$\alpha = \delta + \tau . \tag{2.3}$$

2.1.1 Sonne

Die Sonne ist ein Stern in unserem Planetensystem, welcher seine Strahlungsenergie selbst erzeugt. Sie hat eine Masse von $2*10^{30}$ kg und einen Radius von 700.000 km. Ihre Leuchtkraft von $3{,}8*10^{26}$ W erzeugt sie in ihrem Inneren durch Kernfusion. Sie besteht gegenwärtig etwa zu 73% aus Wasserstoff, zu 25% aus Helium und zu 2% aus schwereren Elementen.

Die Sonne besteht aus verschiedenen Schichten. Im Kern der Sonne befindet sich die Fusionszone. Hier entstehen durch Kernfusion energiereiche Photonen. Sie besitzen keine Ruhemasse und verlieren ihre Existenz durch die vollständige Energieabgabe an die Materie. Diese Photonen haben im sehr dichten Inneren der Sonne eine sehr kleine mittlere freie Weglänge. Der Weg eines Photons durch die Strahlungs- und die Konvektionszone der Sonne wird dabei so oft umgelenkt, dass es etwa eine Million Jahre unterwegs ist, bis es die Oberfläche erreicht und in den freien Weltraum fliegen kann. Dabei entstehen durch die Stöße mit den Kernen und Elektronen des Sonnenplasmas weitere energieärmere Photonen. Die Temperatur der Sonne nimmt nach außen hin ab. In einer dünnen Schicht an der Sonnenoberfläche, der Photosphäre, wird die mittlere freie Weglänge der Photonen so groß, dass sie die Sonne ohne weitere Wechselwirkung verlassen können. Die Temperatur der Photosphäre beträgt 5780 K und wird als Oberflächentemperatur der Sonne

bezeichnet. Nach der Photosphäre folgen zwei weitere Schichten, die Chromosphäre und die Korona, in der die Temperatur erneut ansteigt (bis zu 10^6 K in der Korona). Durch die sehr geringe Dichte der Chromosphäre trägt diese kaum zur Gesamtstrahlung der Sonne bei. Jedoch bewirken die hohen Koronatemperaturen und die daraus folgenden hohen Teilchengeschwindigkeiten ein Entweichen der Koronamaterie nach außen. Dieser kontinuierliche Materiestrom wird als Sonnenwind bezeichnet, welcher überwiegend aus Protonen, Elektronen und im geringen Maße aus α-Teilchen (Helium-Kernen) besteht [34].

Diese geladenen Teilchen üben ebenso wie die Photonen einen Impuls und somit einen Druck auf eine Fläche aus. Mit der Annahme, dass der Ionenfluß je zur Hälfte aus Elektronen und Protonen besteht, wobei der Einfluss der Elektronen aufgrund der geringen Ruhemasse im Verhältnis zur Masse der Protonen vernachlässigt wird, ergibt sich eine Abschätzung des Drucks aufgrund des Sonnenwinds P_W in Erdentfernung von der Sonne zu

$$P_W \approx 3 \cdot 10^{-9} \frac{N}{m^2}. \tag{2.4}$$

Dieser Druck ist im Vergleich mit dem Strahlungsdruck der solaren Photonen in derselben Entfernung um den Faktor 10^{-3} bis 10^{-4} geringer [35]. Daher wird der Sonnenwind als mögliche Antriebsquelle eines Sonnenseglers vernachlässigt und bei den folgenden Berechnungen nicht weiter berücksichtigt.

Die Energie der Sonne wird überwiegend als elektromagnetische Strahlung in Form der Photonen freigesetzt. Bei einer Oberflächentemperatur von 5780 K strahlt die Sonne die meiste Energie im Bereich von infrarotem und sichtbarem Licht ab. Das Sonnenspektrum reicht jedoch vom langwelligen Röntgen- bis in den langwelligen Radiobereich hinein. Dies entspricht einem Wellenlängenbereich der Strahlung von 140 Nanometer bis zu zehn Zentimeter. Bei einem blau-grün sichtbaren Licht mit einer Wellenlänge von 500 Nanometer hat die Sonne ihre höchste Intensität. Für folgende Berechnungen wird das Spektrum der Sonne im Bereich zwischen 200 und 1300 Nanometer betrachtet. Die Photonen mit diesen Wellenlängen haben Energien zwischen sechs und einem Elektronvolt [34].

Die gemittelte extraterrestrische Strahlungsstärke der Sonnenstrahlung, die auf eine senkrecht zur Einfallsrichtung stehende Einheitsfläche von einem Quadratmeter in Erdnähe – also einem Abstand der Sonne von einer Astronomischen Einheit (AU) – fällt, wird als Solarkonstante bezeichnet. Die Solarkonstante beträgt 1367 W/m^2. Dieser Wert wird in der Literatur häufig als Standardparameter zur Berechnung des Strahlungsdrucks der Sonne eingesetzt.

2.2 Strahlungsdruck

Die Impulse von Photonen, zum Beispiel die der Sonne, üben auf eine bestrahlte Fläche einen Strahlungsdruck P_S aus. Dieser Druck berechnet sich aus der Leistungsflussdichte W der Strahlungsquelle geteilt durch die Lichtgeschwindigkeit c.

$$P_S = \frac{W}{c}. \tag{2.5}$$

Wird die Strahlung an der Oberfläche ideal reflektiert, verdoppelt sich der Wert des Strahlungsdrucks [49]. Der in der Literatur [2, 12, 35] vielfach beschriebene Wert des Strahlungsdrucks der Sonne bei einer Bestrahlungsstärke von einer Solarkonstante ist

$$P_S = 9 \cdot 10^{-6} N/m^2 \tag{2.6}$$

auf ein ideales Sonnensegel. Die physikalische Herleitung des Strahlungsdrucks erfolgt in den folgenden Abschnitten über zwei unterschiedliche physikalische Beschreibungen der Impulsübertragung. Zunächst wird die quantenmechanische Beschreibung der Strahlung als Energiepaket, den Photonen dargestellt. Danach wird die elektromagnetische Beschreibung der solaren Strahlung betrachtet. Die experimentelle Betrachtung des Strahlungsdrucks sowie die daraus resultierenden Störeffekte folgen im Abschnitt 2.2.3.

2.2.1 Strahlungsdruck im Teilchenbild

Die Vorstellung des Strahlungsdrucks in der Quantenmechanik ergibt sich aus der Impulsübertragung der Photonen bei Emission, Absorption und Reflexion.

Nach dem Planck‘schen Strahlungsgesetz transportiert ein Photon mit der Frequenz ν die Energie E

$$E = h\nu, \tag{2.7}$$

wobei h das Planck‘sche Wirkungsquantum ist. Obwohl diese Gleichung nach Planck benannt ist, hat Einstein eine äquivalente Gleichung aus der statistischen Thermodynamik hergeleitet. Erst später erkannte Einstein, dass seine Proportionalitätskonstante zwischen Energie und Frequenz, welche die diskreten Energieniveaus thermischer Strahlungsquellen beschreibt, tatsächlich das Planck‘sche Wirkungsquantum ist.

Zusätzlich zu der Quantenbetrachtung erlaubt es die Masse-Energie-Äquivalenz der speziellen Relativitätstheorie, die Gesamtenergie E eines bewegten Körpers als

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \tag{2.8}$$

zu beschreiben, wobei m_0 die Ruhemasse des Körpers, p dessen Impuls und c die Lichtgeschwindigkeit ist. Der erste Term der Gleichung enthält die Ruheenergie des

Körpers, während der zweite Term die Bewegungsenergie darstellt. Da ein Photon keine Ruhemasse besitzt, folgt

$$E = pc\,. \tag{2.9}$$

Somit ergibt sich unter Verwendung der Photonenenergie laut Gleichung (2.7) und Gleichung (2.9) der Impuls, welcher über ein Photon transportiert wird:

$$p = \frac{h\nu}{c}\,. \tag{2.10}$$

Diese Gleichung ist hergeleitet durch eine Kombination der Quantenmechanik mit der speziellen Relativitätstheorie.

Um den Druck auf einen Körper zu berechnen, wird der Impuls eines auf den Körper treffenden Photonenstroms betrachtet. Der Energiestrom bzw. die Leistungsflussdichte W (die Energiemenge, die pro Zeiteinheit durch eine bestimmte Fläche fließt) kann in einem Abstand R_S von der Sonne über die Sonnenintensität L_S und der Distanz Sonne-Erde R_E:

$$W = \frac{L_S}{4\pi \cdot R_S{}^2} = W_E\left(\frac{R_E}{R_S}\right)^2 \tag{2.11a}$$

mit

$$W_E = \frac{L_S}{4\pi R_E^2}\ , \tag{2.11b}$$

beschrieben werden. Hierbei ist W_E der Energiestrom, gemessen im Erdabstand von der Sonne (1 AU). Die Energie ΔE, welche über eine Oberfläche der Größe A senkrecht zur einfallenden Strahlung in der Zeit Δt transportiert wird, bestimmt sich zu

$$\Delta E = W \cdot A \cdot \Delta t. \tag{2.12}$$

Entsprechend Gleichung (2.9) entspricht diese Energie einem Impuls Δp:

$$\Delta p = \tfrac{\Delta E}{c}. \tag{2.13}$$

Der Druck P_S, welcher auf die Oberfläche ausgeübt wird, ist definiert als die Impulsübertragung pro Zeiteinheit pro Flächeneinheit, so dass

$$P_S = \frac{1}{A}\left(\frac{\Delta p}{\Delta t}\right). \tag{2.14}$$

Unter Betrachtung der Gleichungen (2.12) und (2.13) ergibt sich der Druck auf die Oberfläche wegen der Impulsübertragung der Photonen zu

$$P_S = \frac{W}{c}\,. \tag{2.15}$$

Für eine ideal reflektierende Oberfläche beträgt der Strahlungsdruck den zweifachen Wert aus Gleichung (2.15), da der Impuls auf die Oberfläche von den einfallenden Photonen ausgeübt wird und ebenso von den reflektierten Photonen [12].

2.2.2 Strahlungsdruck im Wellenbild

Die Impulsübertragung des Lichts auf eine reflektierende Oberfläche kann auch im Bild der elektromagnetischen Welle beschrieben werden.

Die elektrische Feldkomponente $\mathbf{E_{el}}$ der Welle induziert einen elektrischen Strom **j** im elektrisch leitenden Segel. Die magnetische Komponente **B** der induzierten Welle generiert eine Lorentzkraft **j** x **B** in Richtung der sich ausbreitenden Welle. Der induzierte Strom generiert eine weitere elektromagnetische Welle, die Reflexion der induzierten Welle. Bei einer Welle, die sich entlang der x-Achse ausbreitet, ist die ausgeübte Kraft auf ein Stromelement gegeben durch

$$df = j_z \cdot B_z dx dy dz, \tag{2.16}$$

wobei j_z die induzierte Stromdichte in der Oberfläche des Reflektors ist. Der resultierende Druck auf dieses Stromelement, definiert als Kraft pro Flächeneinheit, kann geschrieben werden als

$$dP = j_z \cdot B_y dx. \tag{2.17}$$

Mit Maxwells Gleichungen der Elektrodynamik kann das Stromelement als eine Feldgröße geschrieben werden. Unter Verwendung der Feldgröße ist der zeitlich gemittelte Druck gegeben mit

$$\langle dP \rangle = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{2}\varepsilon_0 E_z^2 + \frac{1}{2\mu_0} B_y^2\right) dx. \tag{2.18}$$

Der Term in den Klammern bezeichnet die Energiedichte U mit den Beträgen der elektrischen und magnetischen Feldstärken E_{el} und B:

$$U = \frac{1}{2}\varepsilon_0 {E_{el}}^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2. \tag{2.19}$$

ε_0 ist die Permittivität des Vakuums und μ_0 ist die Permeabilität des Vakuums. Der Druck, welcher auf ein Flächenelement $dydz$ der Folie mit Dicke Δl wirkt, kann durch Integration der Gleichung (2.18) berechnet werden, wie folgt

$$\langle P \rangle = -\int_0^{\Delta l} \frac{\partial U}{\partial x} dx. \tag{2.20}$$

Für ein ideal absorbierendes Medium ist der auf die Fläche ausgeübte Druck bestimmt durch die Gesamtenergiedichte der elektromagnetischen Welle, das heißt

$$\langle P \rangle = \langle U \rangle. \tag{2.21}$$

Man betrachtet nun zwei ebene Wellen, welche durch die Distanz Δx getrennt sind und auf die Oberfläche A einfallen. Das Raumvolumen zwischen den beiden auftreffenden Wellen ist $A\Delta x$. Der Abstand Δx zwischen den Wellen ist äquivalent zu $c\Delta t$, weil sich die Welle im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit c ausbreitet; Δt ist der Laufzeitunterschied zwischen den beiden Wellenfronten. Die Energiedichte der elektromagnetischen Welle ist daher gegeben durch

$$U = \frac{\Delta \mathrm{E}}{A(c\Delta t)}, \tag{2.22}$$

wobei ΔE die Energie ist, welche in dem Volumenelement enthalten ist. Des Weiteren kann der Energiestrom W, welcher auf die Oberfläche trifft, beschrieben werden als

$$W = \frac{1}{A}\left(\frac{\Delta E}{\Delta t}\right). \tag{2.23}$$

Folglich, unter Anwendung der Gleichung (2.22), kann die Energiedichte beschrieben werden als

$$U = \frac{W}{c}. \tag{2.24}$$

Dies ist derselbe Ausdruck wie in Gleichung (2.15), bei welcher der Strahlungsdruck aus der Quantenbeschreibung des Lichts im vorherigen Abschnitt abgeleitet wurde. Wie erwartet sind die Quanten- und elektromagnetischen Beschreibungen des Strahlungsdrucks schlussendlich äquivalent. In der elektromagnetischen Beschreibung des Lichts ist der Strahlungsdruck die Energiedichte der elektromagnetischen Welle, so wie Maxwell es in seiner Abhandlung über Elektrizität und Magnetismus 1873 angibt [12, 31].

2.2.3 Strahlungsdruck experimentell

1900 begann P. N. Lebedew mit den ersten experimentellen Nachweisen des Strahlungsdrucks [36]. Er ging bei seinen Untersuchungen von folgender vereinfachten Definition für den Strahlungsdruck P_{S_rech} aus:

$$P_{S_rech} = \frac{W}{c}(1 + \rho), \tag{2.25}$$

wobei ρ den Reflexionsgrad der bestrahlten Fläche beschreibt. Das Reflexionsvermögen liegt zwischen $\rho = 0$ für einen absolut schwarzen und $\rho = 1$ für einen perfekt spiegelnden Körper [15].

Lebedews Versuchsaufbau bestand aus einem Torsionspendel in einer Vakuumkammer. Ein Faden mit bekanntem Richtmoment wurde in die Vakuumkammer gehängt. An diesem Faden befestigte Lebedew verschiedene Probeflächen. Diese Proben waren aus unterschiedlichen Metallen (reflektierend) und zum Teil mit schwarzer Farbe (absorbierend) beschichtet. Eine Bogenlampe bestrahlte die

Probenflächen, welche durch den Strahlungsdruck eine Kraft erfuhren und den Torsionsfaden aus seiner Ruhelage auslenkten. Über den Winkel dieser Auslenkung lässt sich die auf die Probe wirkende Kraft bestimmen.

Zufällige Schwankungen in der Lichtintensität der Bogenlampe erschwerten die Strahlungsdruckmessung. Dieser Ungenauigkeit begegnete Lebedew, indem er seine Messungen mehrfach wiederholte. Mittels des Torsionspendels bestimmte Lebedew einen Strahlungsdruck, welcher den Wert des erwarteten Drucks nach Maxwell um knapp 20% überstieg.

Lebedew konnte den Strahlungsdruck in seinen Versuchen experimentell nachweisen. Er wies nach, dass die Lichtstrahlen sowohl auf einen absorbierenden als auch auf einen reflektierenden Körper einen Druck ausüben. Die störenden Krafteinwirkungen aufgrund von Konvektion und radiometrischen Kräften reduzierte Lebedew - soweit es der Stand der Technik zuließ - über einen möglichst niedrigen Umgebungsdruck von etwa $1*10^{-4}$ mbar [37].

Etwa zur gleichen Zeit wie Lebedew hatten die Amerikaner E. F. Nichols und G. F. Hull an dem experimentellen Nachweis des Maxwell-Bartolischen Drucks gearbeitet [38]. 1900 bezogen sie ein neues Labor, welches alle Voraussetzungen für ihre Experimente zur Ermittlung des Strahlungsdrucks erfüllte. Sie hatten dieselben experimentellen Herausforderungen zu bewältigen wie ihr russischer Kollege. Ihre Versuche begannen 1901. Die Resultate der Strahlungsdruckmessung von Nichols und Hull wichen nur noch um 10% von dem berechneten Strahlungsdruck von Maxwell und Bartoli ab. Diese Abweichung lag im Bereich des zu erwartenden Messfehlers [39].

Knapp 100 Jahre später untersuchte die NASA im *Marshall Space Flight Center* den Strahlungsdruck an reflektierenden Folien. Der Versuchsaufbau bestand aus einem Rezipienten mit einer Ionenpumpe, einem Solarsimulator und einer Mikrowaage. In dem Rezipient befand sich eine kreisförmige Aluminiumfolie von etwa 120 mm Durchmesser und einer Dicke von 3 µm. Der Solarsimulator strahlt mit einer Beleuchtungsstärke von 2,5 Solarkonstanten, also etwa 3420 W/m², auf die Folie. Eine Testreihe mit 13 Messungen ergab einen Mittelwert der gemessenen Kraft auf die Folie von 0,217 µN. Dieser Wert weicht um 6,4% von dem berechneten Wert der zu erwartenden Kraft ab [18].

Bei den experimentellen Untersuchungen stellen sich die Effekte durch die Restgas-atmosphäre als störend heraus. Durch die Bestrahlung der (Proben-) Oberflächen erwärmen sich die Gasschichten, welche sich über der bestrahlten Fläche befinden. Die Gasmoleküle geraten aufgrund der thermischen Energie in Bewegung und üben somit ebenfalls einen Impuls auf die bestrahlte Fläche aus. Diese Konvektion bzw. diese radiometrischen Kräfte gilt es genauer zu betrachten.

2.3 Vakuumbedingungen

Als Vakuum wird umgangssprachlich der Zustand in einem Raum bei Drücken unterhalb des Atmosphärendrucks bezeichnet. Normgerecht wird Vakuum definiert als „der Zustand eines Gases, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchenzahldichte niedriger ist als außerhalb oder wenn der Druck des Gases niedriger ist als 300 mbar, das heißt kleiner als der niedrigste auf der Erdoberfläche vorkommende Atmosphärendruck.“ [42] Der Wert von 300 mbar in der Norm wird verständlich durch Betrachtung der barometrischen Höhenformel. Der Druck in der Atmosphäre sinkt mit steigender Höhe durch das abnehmende Gewicht der über einer Fläche stehenden Luftsäule.

$$p_h = p_0 \cdot exp\left(-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot H}{p_0}\right). \tag{2.26}$$

Bei der Höhe H herrscht der Atmosphärendruck p_h. p_0 ist mit 1013,25 mbar der Atmosphärendruck auf Meereshöhe. Die Dichte der Luft auf Meereshöhe ρ_0 liegt bei einer Temperatur von 0°C bei 1,293 kg/m³. g ist die Schwerebeschleunigung.

Bei einer Höhe des Mount Everests erhält man einen Druck von 335 mbar. Damit erklären sich die in der Norm genannten 300 mbar als niedrigster auf der Erdoberfläche vorkommender Atmosphärendruck.

Auf einer Reiseflughöhe eines Verkehrsflugzeugs von rund 10.000 m ist der Druck bereits auf 290 mbar gesunken. Wetterballons erreichen eine Höhe von bis zu 30 km, wo ein Druck von 24 mbar herrscht. Polarumlaufende Wettersatelliten fliegen auf einer polaren, sonnensynchronen Bahn in etwa 800 km Höhe. Hier ist der Druck bereits auf etwa 10^{-6} mbar abgefallen. Je weiter man sich von einem Planeten, einem Stern oder einem Sonnensystem entfernt, umso niedriger wird der Druck. Im interstellaren Raum des Weltalls herrschen die niedrigsten bekannten Drücke (~10^{-18} mbar) [43]. In der folgenden Tabelle 2.1 sind die die einzelnen Druckbereiche unterteilt und die Moleküldichte dargestellt.

Tabelle 2.1: Definition der Druckbereiche [43]

Druckbereich	Druck [mbar]	Moleküle pro cm³	Mittlere freie Weglänge der Moleküle
Normaldruck	1013,25	$2{,}7 * 10^{19}$	68 nm
Grobvakuum	300…1	$10^{19}…10^{16}$	0,1…100µm
Feinvakuum	1…10^{-3}	$10^{16}…10^{13}$	0,1…100mm
Hochvakuum	$10^{-3}…10^{-7}$	$10^{13}...10^{9}$	100mm…1km
Ultrahochvakuum	$10^{-7}…10^{-12}$	$10^{9}…10^{4}$	1…10^{5}km
Ideales Vakuum	0	0	∞

2.3.1 Umgebungsdruck

Das Gas in einem Behälter übt eine Kraft auf die Behälterwände aus. Der Druck p_V ist definiert als der Betrag einer senkrecht und gleichmäßig auf eine Fläche A wirkenden Kraft F.

$$p_V = \frac{F}{A}. \tag{2.27}$$

In einem geschlossenen Behälter führen die Gasteilchen thermische Bewegungen aus. Die durchschnittlich geradlinige Wegstrecke, die ein Gasteilchen ohne Zusammenstoß mit anderen Gasteilchen zurücklegen kann, wird mittlere freie Weglänge genannt. Bei der Wechselwirkung mit der Wand und auf dem Weg dorthin kommt es zu einer Vielzahl von Stößen auf atomarer und molekularer Ebene. Jeder einzelne Stoß übt durch Impulsübertragung eine Kraft auf die Wand des Behälters aus. Die Vielzahl der Stöße führt dazu, dass bei einem eingeschlossenen Gas ohne äußere Einflüsse an jeder Stelle der gleiche Druck unabhängig von Ort und Richtung der Messung herrscht.

In der Praxis wird nur in Ausnahmefällen mit einem einheitlichen Gas gearbeitet. Im Allgemeinen werden Gemische aus verschiedenen Gasarten verwendet. Die einzelnen Gaskomponenten üben jeweils einen spezifischen Druck aus, welcher als Partialdruck bezeichnet wird. Bei idealen Gasen addieren sich die Partialdrücke der einzelnen Komponenten zum Totaldruck.

Das Volumen einer bestimmten Gasmenge ist bei konstanter Temperatur umgekehrt proportional dem Druck. Das Produkt aus Druck und Volumen ist konstant:

$$p_V \cdot V = const. \tag{2.28}$$

Das Volumen einer bestimmten Gasmenge ist bei konstantem Druck direkt proportional der absoluten Temperatur oder

$$V = const \cdot T. \tag{2.29}$$

Führt man bei einer gegebenen Gasmenge nacheinander eine Druck- und eine Temperaturänderung durch, erhält man

$$\frac{p_V \cdot V}{T} = const. \tag{2.30}$$

Dies gilt für eine bestimmte Menge an Gas. Das Gasvolumen ist bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Druck proportional der Stoffmenge *n:*

$$\frac{\mathrm{p_V \cdot V}}{\mathrm{T}} = \mathrm{n} \cdot \mathrm{const}\,. \tag{2.31}$$

Die Stoffmenge wird durch Wägung bestimmt und durch das Verhältnis der Masse *m* durch die molare Masse *M* ausgedrückt. Die Stoffmenge kann auch als Anzahl der Teilchen *N* im Verhältnis zur Avogadro-Konstante N_A angegeben werden:

$$p_V \cdot V = \frac{N}{N_A} \cdot R \cdot T = N \cdot k \cdot T \tag{2.32}$$

mit *R* als Gaskonstante bzw. k = 1,381*10^{-23} J/K als Boltzmannkonstante [43]. Gleichung (2.32) wird als Zustandsgleichung eines idealen Gases bezeichnet.

2.3.2 Vakuum im Labor

Gasmoleküle sind an allen Werkstoffen gebunden. Auf den Oberflächen der Vakuumrezipienten werden durch Adsorption Gasmoleküle gebunden, die im Vakuum nach und nach wieder abgegeben werden. Bei einer Verringerung des Umgebungsdrucks lösen sich die Moleküle teilweise von den Oberflächen ab. Um den Druck im Rezipienten weiter zu reduzieren und ein „sauberes“ Vakuum zu erhalten, kann der Vakuumrezipienten erhitzt werden. Durch dieses sogenannte Ausheizen desorbieren viele Adsorbate wie Wasser oder Wasserstoff von den Oberflächen und können abgepumpt werden.

Kondensierende Dämpfe, insbesondere Wasserdampf, die sich an den Behälterwänden niederschlagen, sind umgebungsbedingte Verunreinigungen und eine typische Verunreinigung von Vakuumsystemen. Da normale Raumluft etwa 10 g Wasserdampf pro Kubikmeter enthält, ist immer kondensierter Wasserdampf an allen Oberflächen vorhanden. Die Adsorption an Oberflächen ist wegen der starken Polarität der Wassermoleküle besonders ausgeprägt.

Die Desorptionsrate der Metalloberflächen im Rezipienten führt zu einer Ausgasung, und ist umgekehrt proportional zur Zeit (mit niedriger werdender Bedeckungsrate). In guter Näherung kann davon ausgegangen werden, dass die Ausgasung ab einem Zeitpunkt $t > t_0$ linear mit der Zeit erfolgt. t_0 wird typisch mit einer Stunde angenommen:

$$Q_{des} = q_{des} \cdot A \cdot \frac{t_0}{t}. \tag{2.33}$$

Q_{des} stellt den Desorptionsstrom, q_{des} die flächenspezifische Desorptionsstromdichte und A die Fläche dar [43]. Materialien wie Kunststoffe geben aus ihrem Inneren Moleküle ab. Dieser Prozess hat eine langsamere Abnahme der Desorptionsrate zur Folge. [44] In speziellen Tests kann die spezifische Ausgasrate von Materialien als Stoffeigenschaft bestimmt werden.

2.4 Strahlung im Vakuum

Unter Atmosphärendruck ist der Strahlungsdruck nicht zu messen. Die Bewegungen der vielen Moleküle in der Atmosphäre verhindern die sensible Messung des geringen Strahlungsdrucks. Die Impulse der sich bewegenden Moleküle in der umgebenden Luft überlagern die Impulse der Photonen. Die Strahlungsdruckmessung muss im Vakuum stattfinden, um die Auswirkung der störenden Moleküle zu minimieren. Mit dieser notwendigen Randbedingung erfüllt der Messvorgang die speziellen Anforderungen im Weltraum.

2.4.1 Radiometrische Kraft

Bei einem Umgebungsdruck von etwa $5*10^{-2}$ mbar ist das Restgas so stark ausgedünnt, dass die Moleküle nicht mehr untereinander, sondern nur noch mit Oberflächen interagieren. Die Moleküle der Restgasatmosphäre üben unter Bestrahlung einer Oberfläche die sogenannte radiometrische Kraft auf diese Fläche aus. [45] Mit dieser Kraft wird ein Radiometer (Lichtmühle) angetrieben. Ein Radiometer besteht aus einem Glaskolben, welcher mit einem Gas bei einem Druck von etwa $5*10^{-2}$ mbar gefüllt ist. In dem Glaskolben befinden sich vier Flügel, die auf einer Spitze drehbar gelagert sind. Die Flügel sind jeweils von der einen Seite verspiegelt und auf der anderen Seite schwarz gefärbt. Fällt nun Licht oder Wärmestrahlung auf die Flügel, so beginnen sie sich zu drehen, wie Abbildung 2.1 schematisch darstellt.

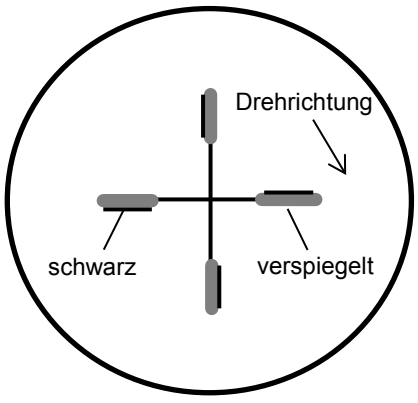

Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer Lichtmühle

Einfallende Wärmestrahlung erwärmt die dunkle Seite der Flügel stärker als die helle. Dadurch erwärmt sich das Gas nahe der dunklen Seite ebenfalls stärker als auf der Gegenseite. Die Gasmoleküle erfahren an der erwärmten Seite eine Verstärkung

ihrer Brownschen Bewegung. Die Geschwindigkeit der Gasteilchen, und damit ihr Impuls, ist bei höherer Temperatur größer. Der Gasdruck auf die warme, dunkle Seite ist etwas höher als der Druck auf die kühlere, reflektierende Seite. Die Gasteilchen schieben somit den Flügel vor sich her. Die Temperaturdifferenz der beiden Seiten mit T_1 und T_2 entspricht einer Druckdifferenz (p_1-p_2) nach folgender Formel:

$$\frac{p_1}{p_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}. \tag{2.31}$$

In der folgenden Betrachtung wird die Folienoberfläche als bestrahlte Fläche untersucht. Unter Bestrahlung erwärmt sich zunächst die obere Folienfläche. Nach wenigen Sekunden hat sich auch die Folienrückseite erwärmt. Zwischen den beiden Seiten stellt sich ein thermisches Gleichgewicht ein. Die Temperatur der direkt bestrahlten Folienoberfläche T_o ist zu Beginn der Bestrahlung größer als T_u. Je größer der Temperaturunterschied der beiden Folienoberflächen, desto größer ist die resultierende Kraft.

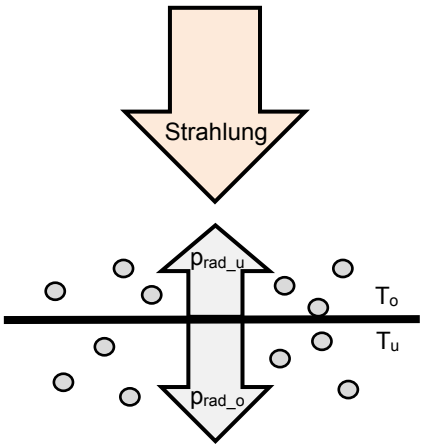

Abbildung 2.2: Impulse p_{rad_o} und p_{rad_u} durch Bestrahlung der Folie in Restgasatmosphäre

Trifft ein Molekül der Restgasatmosphäre auf die Oberfläche der Folie, wird es kurzzeitig adsorbiert. Das Molekül nimmt thermische Energie der Oberfläche auf. Damit erhöht es seinen Impuls. Der Impuls der wechselwirkenden Gasmoleküle steigt und übt einen höheren Druck auf die Folienoberfläche aus.
Bei unterschiedlichen Temperaturen der beiden Folienseiten üben die Moleküle unterschiedliche Impulse auf die Folienoberfläche p_{rad_u} und –rückseite p_{rad_o} aus. Aus der Überlagerung der beiden Impulse resultiert bei unterschiedlichen Temperaturen ein Nettoimpuls:

$$p_{radio} = p_{rad_o} - p_{rad_u}. \tag{2.31}$$

Dieser radiometrische Impuls überlagert sich mit dem Impuls des Strahlungsdrucks. Die Stärke des radiometrischen Impulses ist jedoch abhängig vom Umgebungsdruck. Bei einem Umgebungsdruck von etwa $5*10^{-2}$ mbar hat der radiometrische Effekt seine größte Wirkung. Einerseits ist bei Atmosphärendruck die Rotation der Flügel in der Lichtmühle durch die zu große Konzentration von Gasmolekülen stark behindert,

die Gasreibung ist hier zu hoch. Andererseits bleibt der Rotor schlicht stehen, wenn im Inneren ein Druck von 10^{-3} mbar herrscht. Ab diesem tiefen Druck sind nicht mehr genügend Gasmoleküle vorhanden, um genügend Drehmoment für den gesamten Rotor aufzubringen. Versuche von Nicholson und Hull bestätigen diesen Grenzdruck, ebenso die Experimente von Gerlach und Golsen [17].
Wird die Teilchendichte stark verringert, kann der Strahlungsdruck ohne die störenden Einflüsse der Konvektion bzw. der radiometrischen Kraft vermessen werden. Bei einem Umgebungsdruck unterhalb 10^{-3} mbar sind zu wenige Moleküle pro Volumen vorhanden und der Effekt ist zu vernachlässigen.

2.4.2 Optische Desorption

Bei noch tieferen Umgebungsdrücken zeigt sich ein weiterer Effekt, der zuvor von der Auswirkung der radiometrischen Kraft überlagert wurde. Dieser Effekt entsteht durch die Wirkung der optischen Desorption.

Unter optischer Desorption versteht man die Ablösung von Atomen und Molekülen durch Photonen von einer Oberfläche. Die Teilchen absorbieren die Energie der Photonen. Ist die Photonenenergie höher als die Bindungsenergie der Teilchen, desorbieren die Teilchen von der bestrahlten Oberfläche.

Die Oberflächen der Folienproben sind mit Molekülen, vorwiegend Wasser, kontaminiert. Unter normaler Atmosphäre liegen mehrere Molekülschichten auf der Oberfläche einer solchen Folie. Selbst nach Evakuierung des Rezipienten bleiben die meisten Teilchen an der Folie haften. Die somit ins Vakuum eingebrachten Moleküle lassen sich nicht vollständig aus dem Rezipienten entfernen. Wird das Vakuumsystem bei Raumtemperatur von Atmosphärendruck auf Drücke zwischen 10^{-1} und 10^{-7} mbar evakuiert, ist Wasser der Hauptbestandteil des verbleibenden Gases. Die Kontamination der Oberflächen besteht hauptsächlich aus Wassermolekülen [46]. Für folgende Berechnungen und Abschätzungen wird die Annahme getroffen, dass die Moleküle, welche die Folienoberfläche kontaminieren, ausschließlich Wassermoleküle sind.

Die Desorptionsenergie für Wassermoleküle liegt bei rostfreiem Stahl und Aluminium zwischen 80 und 104 kJ/mol. Wasser hat auf Edelstahl eine Bindungsenergie von $E_{desH2O} = 95$ kJ/mol. Nach den Umrechnungen von $1\ J = 6{,}24 * 10^{18}$ eV und 1 mol mit $6{,}02*10^{23}$ Molekülen entspricht das einer Bindungsenergie von 0,98 eV/Molekül [47].

Die Wassermoleküle bilden wegen ihrer hohen Desorptionsenergie starke Bindungen an den kontaminierten Oberflächen aus. Photonen, deren Energie höher ist als die Desorptionsenergie der Moleküle sind in der Lage, ein Wassermolekül zu desorbieren. Photonen mit Energien:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \geq 0{,}98 \text{ eV} = 1{,}6 * 10^{-19} \text{ Nm} \tag{2.32}$$

entsprechend einer Strahlung der Wellenlänge ≤ λ mit

$$\lambda \leq \frac{h \cdot c}{E} \leq 1{,}3\mu m \tag{2.33}$$

(im sichtbaren Bereich) erfüllen diese Bedingung.

Bei einer Bestrahlungsstärke von einer Solarkonstante kommen etwa $2{,}75*10^{21}$ Photonen pro Quadratmeter und Sekunde an (kumuliert im Wellenlängenbereich zwischen 0,2 und 1,3 µm). Das sind auf einer Fläche von 0,02 m² etwa $5{,}5*10^{19}$ Photonen pro Sekunde. Eine Monolage, bestehend aus Wassermolekülen, hat etwa 10^{18} bis 10^{19} Moleküle pro m², je nach Rauheit der Oberfläche. Somit sind ausreichend Photonen mit mehr als der Schwellenenergie vorhanden, um Wassermoleküle von der bestrahlten Oberfläche zu lösen. Die mittlere Energie dieser Photonen liegt bei $3{,}6*10^{-19}$ Nm. Für die optische Desorption der Wassermoleküle wird weniger Energie benötigt, siehe Gleichung (2.32). Die Photonen können noch eine Energie von $2*10^{-19}$ Nm an die Wassermoleküle mitgeben. Die Energie E der desorbierten Moleküle mit der Masse m und der Fluchtgeschwindigkeit v_F entspricht

$$E = \frac{m \cdot {v_F}^2}{2} \tag{2.34}$$

und

$$v_F = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}}. \tag{2.35}$$

Mit einer molaren Masse von Wasser von 18 kg/kmol und einer übertragenen Energie von $2*10^{-19}$ Nm ergibt sich eine Fluchtgeschwindigkeit der Wassermoleküle von 3651 m/s. Nun werden nicht alle desorbierten Moleküle in Normalenrichtung von der Oberfläche starten. Außerdem ist die Desorptionsrate wahrscheinlich kleiner als 100%.

Die beiden Folienoberflächen verhalten sich aufgrund der Bestrahlung von nur einer Seite unterschiedlich. Zwei Impulse (p_{des_o} und p_{des_u}) entstehen, die sich in Betrag und Richtung unterscheiden, jeweils auf der Vorder- und Rückseite der bestrahlten Folie. Die bestrahlte Folienoberfläche (Vorderseite) erfährt einen erheblich stärkeren Impuls infolge der desorbierten Wassermoleküle.

Die Impulse p_{des_o} und p_{des_u} sind von der Masse und der Geschwindigkeit der desorbierten Moleküle abhängig:

$$p_{des_o,u} = m \cdot v_{o,u}. \tag{2.36}$$

Auf die Folienprobe wirkt insgesamt kurzzeitig ein messbarer Nettoimpuls p_{des}.

$$p_{des} = p_{des_o} - p_{des_u}. \tag{2.37}$$

3. Versuchsaufbau

Im folgenden Abschnitt wird der gesamte Versuchsaufbau detailliert beschrieben. Zunächst wird das Messprinzip dargestellt. Die Messproben und die einzelnen Komponenten der Messeinrichtung werden erläutert. Außerdem werden die physikalischen Effekte, welche die Messergebnisse störend beeinflussen, näher betrachtet. Deren Auswirkung werden abgeschätzt und, falls notwendig, Maßnahmen zur Eliminierung ergriffen. Abschließend wird eine erste Fehlerabschätzung durchgeführt.

Parallel zur technischen Entwicklung der Messeinrichtung müssen bestimmte Testprozeduren definiert werden, um die Strahlungsdruckmessungen störungsfrei und reproduzierbar durchführen zu können. Dazu wird ein Standardmessverfahren entwickelt und festgelegt, welches die Methodik der Testabläufe beschreibt.

3.1 Messprinzip

Das Messprinzip basiert auf der Wägung des Lichts mittels einer Präzisionswaage. Dabei strahlt eine Photonenquelle im Vakuum auf eine Folienprobe, die auf der Präzisionswaage liegt. Treffen die Photonen auf die Oberfläche der Folienprobe, übertragen sie ihren Impuls auf die Fläche und bewirken somit den Strahlungsdruck. Die Waage zeigt den Strahlungsdruck als Masseänderung an. Die Massendifferenz Δm kann, wie Gleichung (3.2) zeigt, in Strahlungsdruck umgerechnet werden. Mit der Schwerebeschleunigung g kann die wirkende Kraft F mit der Messgröße Δm bestimmt werden

$$F = \Delta m \cdot g. \tag{3.1}$$

Über das Verhältnis der ermittelten Kraft F zu der bestrahlten Fläche A kann der Strahlungsdruck P_{S_gem} laut folgender Gleichung bestimmt werden

$$P_{S_gem} = \frac{F}{A} = \frac{\Delta m \cdot g}{A}. \tag{3.2}$$

Die Waage ist vor der Messung in Ruhelage. Wird die Folie bestrahlt, steigt die Masse Δm an. Solange die Folie bestrahlt wird und der Photonenstrom auf die Oberfläche trifft, bleibt der Wert stabil. Erst wenn die Bestrahlung endet, kehrt der Messwert wieder auf den Ausgangswert zurück. Die Waage kommt wieder in die Ruhelage. In den folgenden Testreihen wird als Nachweis des Strahlungsdrucks ein Rechtecksignal erwartet.

Theoretisch kann der Strahlungsdruck entsprechend Gleichung (2.25), die Lebedew bereits verwendet hat, über die Bestrahlungsstärke berechnet werden. Die einfachsten Modelle möglicher Sonnensegelmissionen beziehen sich für die Berechnung des Antriebes auf diese Gleichung. Optimierte Modelle ergänzen die Formel, um einen

weiteren abgeschätzten, undefinierten Verlustfaktor V_F bis zu 20% bzw. einen Wirkungsgrad η von 0,8 [2,6]. Damit ergibt sich die Gleichung zu:

$$(1 + \rho - V_F)\frac{W}{c} = P_{S_rech}. \tag{3.3}$$

Zusammen mit der Gleichung (3.2) ergibt sich:

$$P_S = \frac{W}{c}(1 + \rho - V_F) = \frac{F}{A} \tag{3.4}$$

und

$$(1 + \rho - V_F) = \frac{\Delta m \cdot g \cdot c}{A \cdot W}. \tag{3.5}$$

Die Lichtgeschwindigkeit c sowie die Schwerebeschleunigung g werden für die folgenden Berechnungen als Konstanten angenommen. Die Fläche A und die Bestrahlungsstärke W sind Parameter der Strahlungsdruckmessung. Sie werden für das Experiment entsprechend den Anforderungen festgelegt. Damit gelten diese Größen für eine Strahlungsdruckmessung als zu variierende Konstanten. Die Massendifferenz Δm ist die eigentliche Messgröße. Der Reflexionsgrad ρ_V ist eine materialabhängige Größe, welche sich durch eine konstante Bestrahlung über die Zeit ändern kann. Diese Änderung $\rho_V(t,W)$ ist nicht konkreter zu bestimmen und gilt daher ebenfalls als ein Teil des Verlustfaktors. Dazu addieren sich die Verluste aufgrund der nicht ideal ebenen Oberfläche der bestrahlten Folie. Der Verlustfaktor ergibt sich mit den Verlusten durch die reale Oberfläche V_{A_real} und weiteren unbekannten Verlusteffekten V_0 somit zu

$$V_F = \rho_V(t, W) + V_{A_real} + V_0. \tag{3.6}$$

Entsprechend Gleichung (3.5) kann der Verlustfaktor direkt aus den Messdaten ermittelt werden, inklusive der Verluste noch unbekannter Degradationseffekte. Die Strahlungsdruckmessung liefert damit erste konkrete Werte über die reale Wirkung des Strahlungsdrucks und die resultierenden Kräfte auf ein Sonnensegel.

3.2 Messproben

Für die Auswahl der Messproben sind die folgenden Randbedingungen zu berücksichtigen. Ein Sonnensegel sollte großflächig und dabei möglichst leicht sein, um maximale Beschleunigungen zu erreichen. Die Materialien einer Sonnensegelfolie müssen vakuumtauglich sein. Neben dem geringen Druck herrschen im Weltall weitere extreme Bedingungen. Die Segelfolie wird einerseits von der Sonne aufgeheizt und andererseits den tiefen Temperaturen des Weltraums ausgesetzt. Das Folienmaterial muss somit über einen weiten Temperaturbereich einsetzbar sein. Neben der Temperaturbeständigkeit muss die Folie auch resistent

gegen die hochenergetische UV-Strahlung und die Partikelstrahlung des Sonnenwinds sein. Die mechanischen Eigenschaften, wie eine hohe Reißfestigkeit, spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Auswahl des Materials. Das Sonnensegel wird bereits vor dem eigentlichen Einsatz durch die Fertigung, Verpackung, Beschleunigung ins All und dortiger Entfaltung stark belastet.

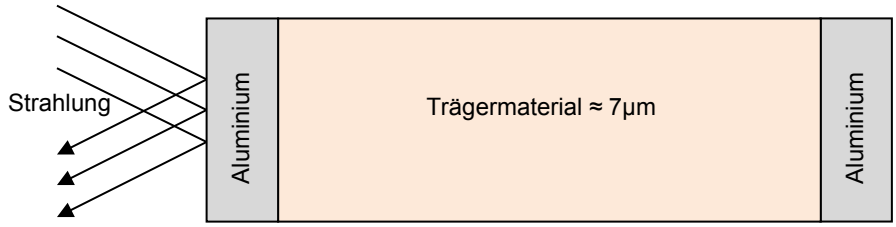

Abbildung 3.1: Typischer Querschnitt einer Segelfolie

Eine Sonnensegelfolie besteht aus einer Trägerfolie auf die metallische Schichten aufgedampft sind. Abbildung 3.1 stellt den typischen Querschnitt einer solchen Folie dar. Das Trägermaterial ist ein Hochleistungskunststoff wie Polyimid oder biaxial orientiertes Polyester.

Diese Materialien sind als Trägermittel durch ihre hohe thermische Stabilität geeignet. Den hohen mechanischen Anforderungen hält dieses Material ebenfalls stand und liefert die nötige mechanische Festigkeit. Die Hochleistungskunststoffe zeigen eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit und besitzen eine geringe Ausgasung. Sie sind weltraumqualifiziert.

Folien aus biaxial orientiertem Polyester wie Mylar® sind nicht UV-beständig. Durch eine Beschichtung wird das Trägermaterial vor der solaren UV-Strahlung geschützt. Poliymide wie Kapton® weisen einen extrem hohen bis gar nicht vorhandenen Schmelzpunkt auf, sowie eine hohe Strahlungsbeständigkeit. Kapton ist bei Temperaturen zwischen -270°C und 400°C temperaturbeständig. Außerdem haben Poliymidfolien gute Hafteigenschaften gegenüber Metallbeschichtungen. Wegen der Vorteile der Kaptonfolie wird dieses Trägermaterial als Basis der Sonnensegelfolien in den DLR Projekten benutzt.

Um eine möglichst hohe Reflexivität zu erzielen, wird die Trägerfolie beidseitig mit Aluminium beschichtet. Aluminium besitzt mit etwa 0,9 einen hohen Reflexionsgrad. Um einer elektrostatischen Aufladung des Sonnensegels entgegenzuwirken wird die Folie beidseitig beschichtet, dabei erhält man zusätzlich eine bessere Kontrolle des Wärmehaushalts des Sonnensegels. Wird die Folie mit einer Bestrahlungsstärke von etwa 1000 W/m² bestrahlt, erhitzt sich die Folienoberfläche innerhalb weniger Sekunden auf eine Temperatur von ca. 100°C. Wegen der geringen Dicke der Folie nehmen die beiden Folienseiten innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde dieselbe Temperatur an.

Abbildung 3.2: Segelfolienprobe

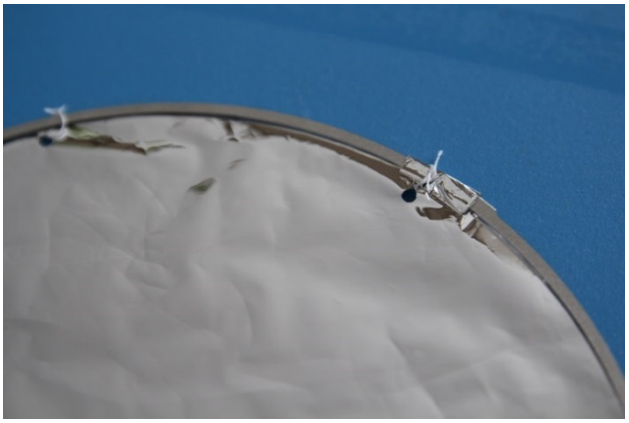

Abbildung 3.3: Elektrische Kontaktierung der Segelfolienprobe

Die im DLR verwendete Segelfolie besteht aus einer 7,5 µm dicken Kaptonfolie, welche beidseitig mit 100nm Aluminium bedampft ist, siehe Abbildung 3.2 und 3.4. Eine mögliche Sonnensegelfolie mit Mylar als Trägerfolie wird ebenfalls untersucht. Die Folie hält der hochenergetischen Bestrahlung bei der Strahlungsdruckmessung nicht stand. Mylar weist nur eine Temperaturbeständigkeit bis 130°C auf. Die Mylarfolie rollt sich bereits nach einem Bestrahlungszyklus an den Rändern auf, siehe Abbildung 3.4.

In Zuge der Entwicklung der Messeinrichtung wird zu Vergleichszwecken in einem Vortest eine reine Aluminiumfolie untersucht, welche auf Abbildung 3.5 zu erkennen ist. Diese Aluminiumfolie hat eine Dicke von 12 µm.

Abbildung 3.4: Mylarprobe nach Bestrahlung

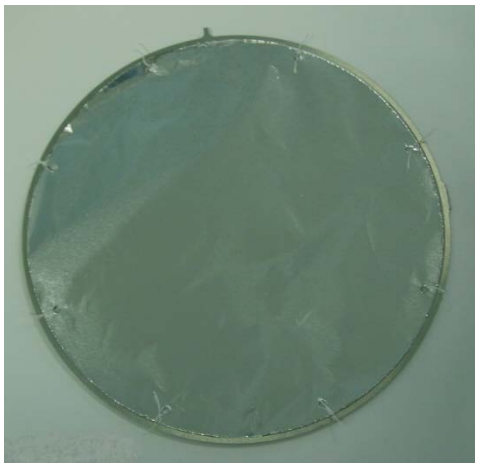

Abbildung 3.5: Folienprobe aus Aluminium

Die Segelfolie wird für die Strahlungsdruckmessung mit einem Aramidfaden lose an einer Halterung, einen Aluminiumring, befestigt. Aramid ist hitzebeständig und weltraumzertifiziert. Um der künftigen Befestigung im Weltall möglichst nahe zu kommen, wird das Foliensegment an die Halterung geknotet. Damit die Folienprobe keine elektrostatische Aufladung erfährt, werden die beiden Folienoberflächen elektrisch leitend miteinander verbunden, siehe Abbildung 3.3. Darüber hinaus ist

der maximale Wägebereich der Waage zu beachten. Die Probe mit ihrer Halterung hat ein Gewicht von 1,87 g. Der Wägebereich bis 2,1 g ist damit nicht überschritten.

Die zuvor erwähnten Knitter der Folie sind auf den Abbildungen 3.2 bis 3.5 deutlich zu erkennen. Diese Unebenheit ist in dem Experiment nicht zu vermeiden und kommt der eigentlichen Anwendung im Weltraum sehr nahe. In der realen Anwendung kommen sogar durch den Verpackungsprozess weitere starke Falten dazu. Die Auswirkung verschiedener Falttechniken kann in einer Strahlungsdruckmessung durch Konfektionierung der Proben ebenfalls untersucht werden.

Mit einem Spektrometer wird der Reflexionsgrad der Folienproben bestimmt. Der Reflexionsgrad wurde in 1nm-Schritten über einen Wellenlängenbereich von 300 bis 1000 nm vermessen. Über den gesamten Wellenlängenbereich liegt der Reflexionsgrad zwischen 0,85 und 0,95, wie in Abbildung 3.6 dargestellt. Mehrere beidseitig Aluminium beschichtete Folien wurden einer Reflexionsmessung unterzogen. Der mittlere Reflexionsgrad über den gesamt vermessenen Frequenzbereich beträgt zwischen 0,9086 und 0,9137 für die Folienproben.

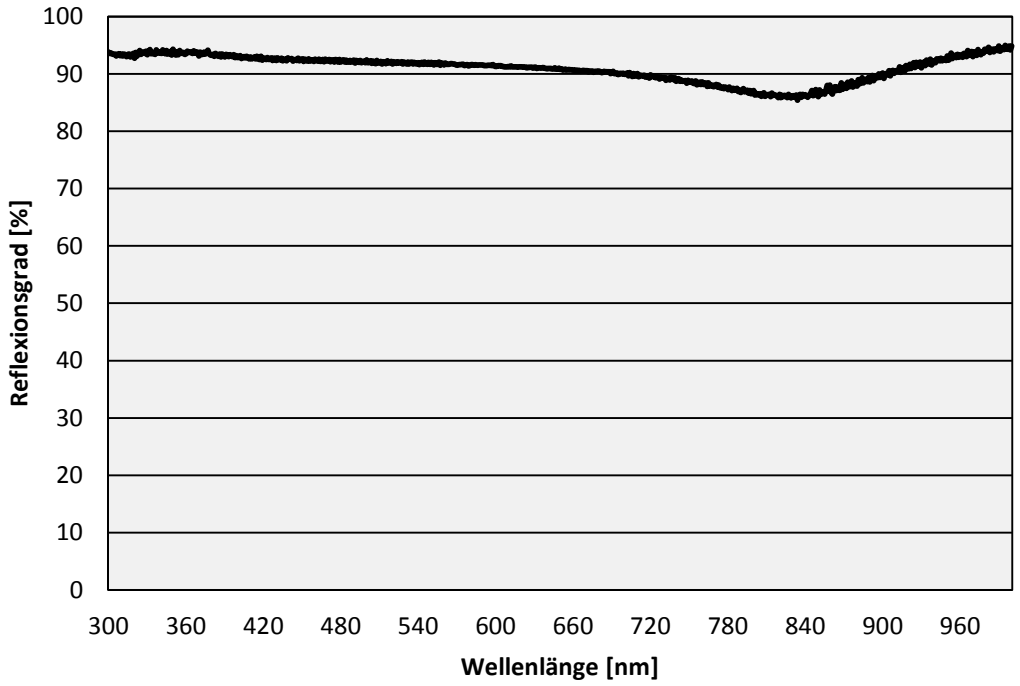

Abbildung 3.6: Ergebnis der Reflexionsmessung

3.3 Messeinrichtung

Die Messeinrichtung besteht im Wesentlichen aus drei Modulen: einer Vakuumkammer, welche die Umgebung des Weltraums simuliert, einer Xenonlampe zur Simulation der solaren Strahlung und einer Präzisionswaage, welche die Krafteinwirkung der Strahlung auf eine Folienprobe ermittelt.

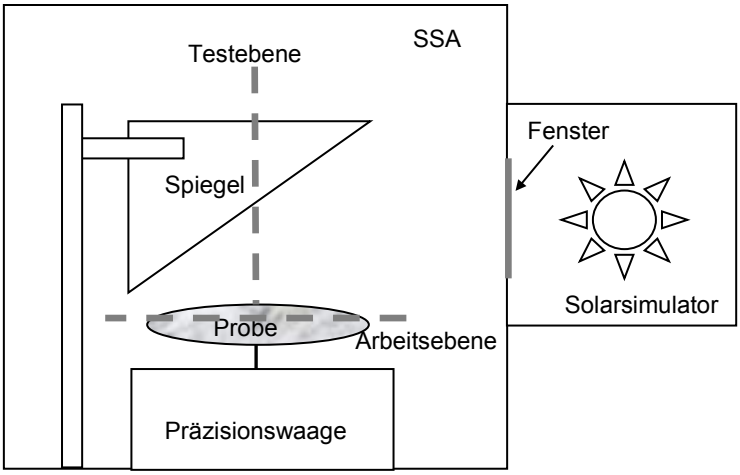

Abbildung 3.7: Skizze des Messaufbaus

Die Strahlung und das Vakuum werden mit der Sonnensimulationsanlage (SSA) realisiert. Die SSA ist ein Rezipient, in dem ein Hochvakuum erzeugt werden kann und in den über ein optisches Fenster Strahlung einer Xenonlampe, die das solare Spektrum approximiert, eingestrahlt werden kann. In dem Rezipienten wird die Präzisionswaage positioniert und mit einer Segelfolienprobe bestückt. Über der Waage wird ein Spiegel installiert, um den Lichtstrahl des Solarsimulators auf die Folienprobe umzulenken, wie in Abbildung 3.7 skizziert.

Dieser, auf den ersten Blick simple Versuchsaufbau, ist höchst sensibel und störanfällig, nicht zuletzt aufgrund der sehr geringen Kräfte, die es zu messen gilt. In den vorbereitenden Arbeiten zur Untersuchung des Strahlungsdrucks wird speziell die Wägefunktion der Präzisionswaage im Hochvakuum und unter intensiver Bestrahlung analysiert. Die Waage der Firma Sartorius ist erfolgreich für eine Strahlungsdruckmessung unter Vakuum modifiziert worden. Im Zuge der Modifikation wird die Reaktion der Waage auf den fehlenden Luftdruck im Vakuum sowie die Auswirkungen der intensiven Bestrahlung in verschiedenen Testreihen analysiert.

3.3.1 Rezipient

Der Rezipient der Vakuumanlage hat ein Volumen von 0,45 m³, bei einer nutzbaren Länge von 800 mm und einer Höhe von 500 mm. Abbildung 3.8 ist eine Aufnahme des SSA-Labors. Dieses Foto zeigt einen Teil der Messwerterfassung sowie den Rezipienten, ein liegender Zylinder mit einem sich öffnenden Deckel auf der einen Seite. Die Rückwand des Rezipienten verfügt über ein optisches Fenster mit einem Durchmesser von 160 mm für die Einstrahlung des Lichtstrahls. Der Rezipient verfügt über verschiedene Vakuumdurchführungen zur elektronischen Datenerfassung sowie für Gase und Flüssigkeiten.
An dem Rezipienten sind zwei Vorpumpen sowie eine Turbomolekularpumpe angeflanscht. Die Vorpumpen evakuieren den Rezipienten innerhalb weniger

Minuten auf einen Druck von 10^{-4} mbar. Danach übernimmt die Turbomolekularpumpe die weitere Reduktion des Drucks. Der erreichbare Enddruck liegt nach 24 Stunden kontinuierlichen Pumpens bei einem Umgebungsdruck von etwa $1*10^{-6}$ mbar. Der Umgebungsdruck wird mittels drei verschiedener Messröhren aufgezeichnet. Die integrierten Messröhren decken verschiedene Druckbereiche ab, somit kann der Druck zwischen 10^{3} und 10^{-7} mbar aufgezeichnet werden. Die Strahlungsdruckmessungen finden in einem Druckbereich bei etwa $1*10^{-6}$ mbar statt. In diesem Bereich liegt die Genauigkeit der Messröhre bei ±15%.
In dem Rezipienten ist eine Kosmoskaltwand, die Shroud, fest installiert. Die Shroud ist ebenfalls zylinderförmig. Sie kann über eine regelbare elektrische Heizung auf 100°C erwärmt werden und mit flüssigem Stickstoff auf -190°C gekühlt werden. Innerhalb der Shroud sind zehn Temperaturfühler verteilt, um den Temperaturgradienten zu messen. Die Heizung wird unter anderem dazu benutzt, um den Rezipienten auszuheizen. Das heißt, seine Temperatur wird auf 100°C erhöht, so dass sich abgelagerte Moleküle von den Oberflächen lösen und durch die Pumpen abgepumpt werden können. Durch diesen Prozess entsteht ein besseres Vakuum. Durch die kryogene Abkühlung mittels flüssigen Stickstoffs, kann der Druck ebenfalls weiter reduziert werden. Weitere Moleküle, vorwiegend Wassermoleküle, frieren an der tiefkalten Oberfläche fest. Der Enddruck im Rezipienten reduziert sich um etwa eine weitere Zehnerpotenz auf etwa $3*10^{-7}$ mbar.

Abbildung 3.8: Sonnensimulationsanlage (SSA)

3.3.2 Solarsimulator

Die Strahlung wird im Labor durch einen sogenannten Solarsimulator erzeugt. Der Solarsimulator besteht aus einer regelbaren 1600W Xenon-Kurzbogenlampe und speziellen Filtern, um dem Spektrum des Sonnenlichts im Weltraum gleichzukommen. Das Spektrum der Schwarzkörperstrahlung einer Xenonbogenlampe entspricht bei einer Temperatur von 5600K etwa dem Spektrum der

Sonne. Des Weiteren haben Xenonbogenlampen über lange Zeit, etwa 700 Stunden, eine stabile Ausgangsleistung.
Über einen elliptischen Spiegel wird die Strahlung der Lampe gesammelt und gerichtet aus dem Gehäuse gelenkt. Der effektive Strahlungsdurchmesser in der Arbeitsebene beträgt 180 mm. Der Lichtstrahl kann mit einer Blende vor dem Eintritt in die Vakuumkammer unterbrochen werden.
In dem Rezipienten ist eine Testebene definiert, welche Abbildung 3.7 zu entnehmen. In dieser Testebene ist die Bestrahlungsstärke zwischen ca. 800 W/m² und 1400 W/m² in Abhängigkeit der Lampenleistung stufenlos regelbar. Das Lichtregelsystem dient der Kurzzeit- und Langzeitstabilisierung des Lichtstrahls der Xenonlampe durch ein magnetisch gesteuertes Stromversorgungsgerät. Das Regelsystem verhindert Lichtschwankungen bedingt durch Netzspannungs-schwankungen und Restwelligkeit des gleichgerichteten Lampenstroms sowie durch das natürliche Flackern der Xenonlampe. Die Anzeige des Lichtmonitors entspricht der Bestrahlungsstärke, welche am fest installierten Lichtempfänger vorliegt. Sie ist auf die Bestrahlungsstärke in der definierten Testebene innerhalb der Vakuumkammer kalibriert. Da wegen der Divergenz der Lichtstrahlung eine ausgeprägte Abhängigkeit der Einstrahlungsleistung (Bestrahlungsstärke) vom Abstand zur Strahlungsquelle besteht, kann es zu Differenzen zwischen der Bestrahlungsstärke in einem konkreten Versuchsaufbau und der Monitoranzeige kommen. Für die exakte Erfassung der Bestrahlungsstärke in der konkreten Arbeitsebene ist eine Nachmessung mit einem geeigneten Strahlungsmesser erforderlich. Der Rezipient der SSA ist für die Strahlungsdruckuntersuchung nur bedingt geeignet. Die waagerechte Einstrahlrichtung des Solarsimulators muss über einen Spiegel auf die Folie umgelenkt werden. Durch die Umlenkung des Lichtstrahls reduziert sich die regelbare Bestrahlungsstärke in der realen Arbeitsebene, die Ebene der Folienoberfläche, auf Werte zwischen 600 W/m² und 1200 W/m².

3.3.3 Waage

Die Waage ist eine Präzisionswaage der Firma Sartorius. Diese Waage ist vom DLR speziell für die Strahlungsdruckmessung angeschafft worden. Mit einer Auflösung von 10^{-7} g bei einem Wägebereich bis 2,1 g kann die Waage die geringen Kräfte, welche solare Strahlung auf eine Segelfolienprobe ausübt, erfassen.

Die Waage arbeitet nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation mit einer Parallelführung und Hebelübersetzung. Die schematische Darstellung dieses Messprinzips ist in Abbildung 3.9 zu erkennen. Wird die Waagschale mit einem Wägegut belastet und somit das Kräftegleichgewicht am Übersetzungshebel gestört, bewirkt das Übergewicht der Waagschale eine Auslenkung des Übersetzungshebels im Bereich des Lagensensors nach oben. Das sich daraus ergebene Eingangssignal am Regelverstärker führt zu einem erhöhten Strom durch

die Spule, und somit zu einem Anwachsen der Gegenkraft, bis wieder Gleichgewicht herrscht und der Hebel in der Nulllage liegt.

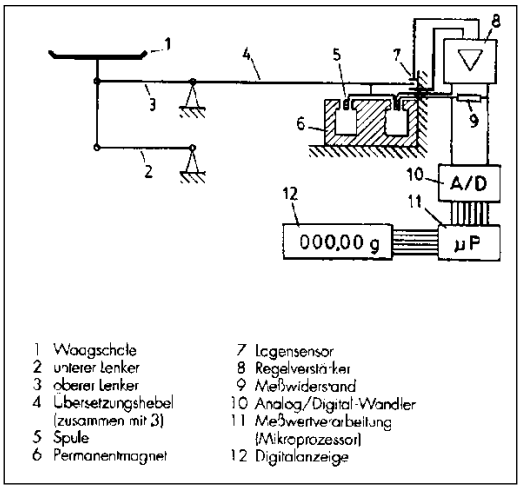

Abbildung 3.9: Schematische Darstellung der Waage [54]

Um die Stabilität des Regelkreises zu gewährleisten und um Abweichungen der Lage des Übersetzungshebels von seiner Soll-Lage möglichst schnell und vollständig auf Null zurückzuführen, erhält der Regelverstärker ein PID-Verhalten. Das Ausgangssignal des Regelverstärkers erhält einen Anteil, der proportional zur Auslenkung am Lagensensor ist, und einen Anteil, der dem Integral der Auslenkung entspricht. Dieser Anteil sorgt dafür, dass auch sehr kleine Abweichungen von der Soll-Lage sich allmählich zu einem deutlichen Ausgangssignal aufsummieren. Der Anteil, der dem Differentialquotienten der Auslenkung, also der Geschwindigkeit des Übersetzungshebels am Lagensensor, entspricht, sorgt für eine schnelle Dämpfung der Bewegung des Übersetzungshebels.

Der gewichtsproportionale Kompensationsstrom durch die Spule wird durch einen Messwiderstand in eine proportionale Spannung umgewandelt, die im nachgeschalteten Wandler digitalisiert wird. Im Mikroprozessor wird das Signal verarbeitet und schließlich in der Anzeigeneinheit dargestellt [54].

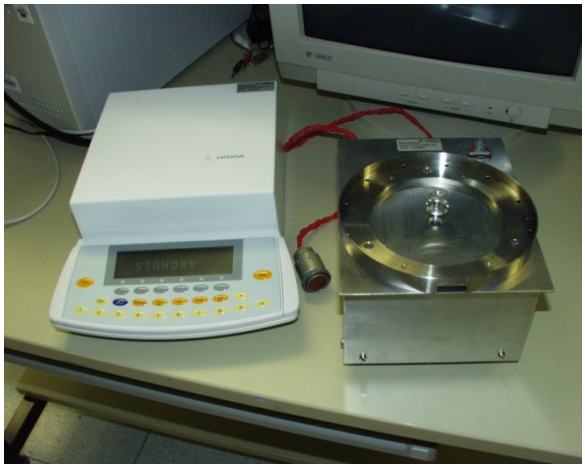

Abbildung 3.10: Präzisionswaage: Bedieneinheit (links) und Wägezelle (rechts)

Die Präzisionswaage ist handelsüblich und für den Gebrauch unter Atmosphärendruck ausgerichtet. Die Präzisionswaage besteht aus einer Wägezelle und einer Anzeige- bzw. Bedieneinrichtung, wie in Abbildung 3.10 dargestellt. Neben der elektrischen Versorgung über Netzspannung verfügt die Bedieneinrichtung über Schnittstellen zum Anschluss von Zusatzeinrichtungen wie Messwertdrucker oder PC. Die Bedieneinheit ist von der Wägezelle getrennt, so dass sie außerhalb des Vakuums betrieben werden kann. Die Verbindungskabel sind teflonisoliert und mit Vakuumdurchführungen ausgestattet. Die Wägezelle ist weitestgehend aus Metall gefertigt. Der Hersteller verzichtete auf den bei Präzisionswaagen üblichen Windschutz, da im Vakuum kein „Wind“ herrscht. Darüber hinaus ist die Waage in verschiedenen Testreihen den extremen Bedingungen, wie der Bestrahlung, konfektioniert worden. Eine systematische Darstellung der Waagenmodifikation ist dem Anhang zu entnehmen.

Speziell für die Strahlungsdruckmessung ist eine Waagschale für die Folienproben gefertigt worden, siehe Abbildung 3.11. Die maximale Größe der Segelfolienprobe ist durch den Durchmesser des Lichtstrahls des Solarsimulators bestimmt. Die Waagschale hat einen Durchmesser von 162 mm.

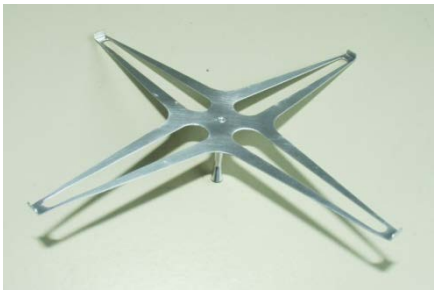

Abbildung 3.11: Waagschale

3.4 Störeffekte

Wird die Waage in die Messkette installiert, müssen die Effekte betrachtet werden, die das Messergebnis möglicherweise beeinflussen. Die fehlende Atmosphäre im Rezipienten und die hohe Bestrahlungsstärke könnten auf die Waage störend einwirken. Die Auswirkung der energetischen Strahlung muss unter drei Aspekten betrachtet werden. Zum einen entsteht ein thermischer Effekt, zum anderen kann die optische Einwirkung auf die Funktionsweise der Waage Einfluss nehmen. Drittens können die ionisierten Teilchen der Strahlung einen elektrostatischen Effekt hervorrufen.

3.4.1 Auftrieb

Nach dem Archimedischen Prinzip verliert ein Körper im Schwerefeld der Erde und in einem ihn umgebenden Medium so viel an Gewicht, wie die von ihm verdrängte Menge des umgebenden Mediums wiegt. Bei Wägungen unter Atmosphärendruck ist dieses Medium Luft. Das bedeutet, dass zum Beispiel ein Körper aus Stahl mit einer

Masse von 200 g in Luft etwa 30 mg weniger wiegt als im Vakuum. Eine solche Gewichtsverminderung zeigt die hochempfindliche Waage zwangsläufig an. Daher verfügt die Waage über eine Luftauftriebskorrektur, um unter Atmosphäre hochgenaue Absolutbestimmungen durchführen zu können. Der Auftrieb wird hierbei durch ein Kompensationsgewicht ausgeglichen. Im Vakuum wirkt jedoch der Luftdruck nicht mehr auf das Wägegut ein und die Waage reagiert auf den fehlenden Auftrieb mit einem Offset. Die Bestimmung des zu messenden Strahlungsdrucks passiert über die Ermittlung der Massendifferenz zwischen der bestrahlten und unbestrahlten Folienprobe. Der Effekt des fehlenden Auftriebs hat somit keine Auswirkung auf die Messung des Strahlungsdrucks.

3.4.2 Lichteinfall

Die Präzisionswaage ermittelt die Ruhelage ihres Systems über einen optischen Lagensensor. Die Nulllage des Übersetzungshebels wird von zwei Photozellen erfasst. Der Hebel hat an seinem Ende einen Schlitz. Auf der einen Seite dieses Schlitzes ist eine Diode montiert, welche Licht aussendet. Auf der anderen Seite sind die zwei Photozellen montiert. Sie erfassen das Licht der Diode, welches durch den Schlitz fällt. Der Sensor ist somit in der Lage, die Nulllage des Übersetzungshebels auf einige Nanometer genau zu bestimmen. Da dieses hochsensible System mittels Lichtstrahlung funktioniert, sind eingehende Untersuchungen im Vorfeld der Strahlungsmessung unternommen worden. Bei diesen Testreihen wurde nachgewiesen, dass die Bestrahlung der Folienproben keine Auswirkung auf den optischen Lagesensor der Waage hat.

3.4.3 Thermische Belastung

Bei der Auswirkung des thermischen Effekts infolge der Bestrahlung zeigt sich jedoch ein starker Einfluss auf das Wägeergebnis. Zum einen muss die Waage auf einer konstanten Temperatur, welche in ihrem Arbeitsbereich liegt, gehalten werden. Dieses wird durch eine konstante Temperierung der Waage plus einer Haube aus Multi-Layer-Insulation (MLI) gewährleistet, welche in Abbildung 3.12 dargestellt ist.

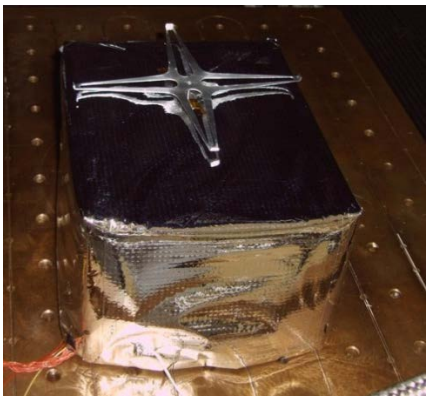

Abbildung 3.12: Waage mit MLI-Haube auf einer Temperierplatte

Zum anderen erwärmt sich die Waagschale aufgrund der Bestrahlung. Die Wärmeleitung pflanzt sich ins Innere der Waage fort. Die Waagschale muss von der Waage thermisch entkoppelt werden. Dies geschieht durch einen thermischen Isolator, welcher in Abbildung 3.13 mit Ankopplung an die Waagschale dargestellt ist. Als geeignetes Medium erweist sich eine dünne Glas-Kapillare. Der ursprüngliche Stift wird geteilt und die Glaskapillare dazwischen geklebt. Um die elektrische Ableitfähigkeit weiterhin sicher zu stellen, wird das Glasrohr mit elektrisch leitfähigem Kleber befestigt und mit Gold besputtert.

Abbildung 3.13: Waagschale mit vergoldetem Glasrohr als thermischen Isolator

3.4.4 Elektrostatik

Die hochenergetischen Photonen der UV-Strahlung können aus der Aluminiumbeschichtung Elektronen herausschlagen. Die Folie wird sich aufgrund der fehlenden Elektronen positiv aufladen. Ein elektrostatisches Feld wird sich ausbilden. Ein solches Feld wirkt sich störend auf die Präzisionswaage aus. Die Gewichtsanzeige driftet in eine Richtung und die Anzeigewerte sind nicht mehr reproduzierbar.

Um diesem Störeffekt entgegen zu wirken, ist das gesamte Messsystem auf ein elektrisches Potential gelegt worden. Die beiden Folienseiten der Probe sind elektrisch kontaktiert, wie in Abbildung 3.2 zu erkennen. Der elektrische Widerstand zwischen den beiden Folienseiten beträgt $< 20\,\Omega$. Die Folienprobe ist über die Halterung und die Waagschale (beides aus Aluminium) mit der Waage elektrisch leitend verbunden. Der elektrische Widerstand zwischen Folienoberfläche und Waage beträgt ca. $50\,\Omega$. Abbildung 3.14 zeigt den Umlenkspiegel und seine Halterung, welche durch Kupferdrähte verbunden sind. Der Spiegel, die MLI-Haube und die Waage sind über mehrere Kupferdrähte mit dem Rezipienten elektrisch kontaktiert und liegen somit auf demselben elektrischen Potential. Die Ausbildung elektrostatischer Felder ist somit verhindert.

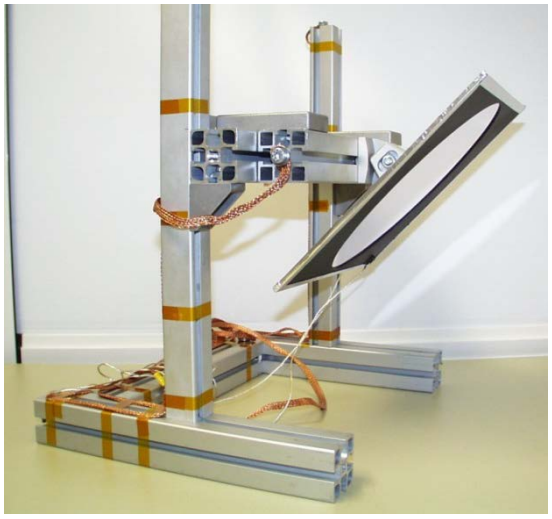

Abbildung 3.14: Umlenkspiegel mit Erdungslitzen

3.5 Fehlerabschätzung

Den Strahlungsdruck P_S gilt es in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern, wie unterschiedliche Folieneigenschaften und variierende Bestrahlungsstärke im Experiment zu validieren und quantifizieren. Grundsätzlich ist jede Messung einer physikalischen Größe mit Fehlern behaftet. Um eine erste Abschätzung der Abweichungen und Unsicherheiten bei den Messergebnissen zu erhalten, werden zunächst die Größen aus der Gleichung (3.5) betrachtet.

Die **Lichtgeschwindigkeit** ist eine Konstante. Im Vakuum bewegen sich die Photonen mit einer Geschwindigkeit von 299.792.458 m/s fort.

Die **Schwerebeschleunigung** oder g ist ortsabhängig nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz. Der Abstand zur Erdoberfläche hat einen Einfluss auf die Größe der Schwerebeschleunigung. An den Erdpolen wirkt eine Schwerebeschleunigung von etwa 9,83 m/s² und am Äquator nur etwa 9,78 m/s². Die Schwerebeschleunigung verhält sich laut den Gleichungen (3.1) und (3.2) proportional zur Gewichtskraft und zum Strahlungsdruck. Die ortsabhängige Schwankung der Schwerebeschleunigung hat auf die Messung im Labor keinen Einfluss. Für die Berechnung der Gewichtskraft wird in den folgenden Berechnungen der Standardwert der Schwerebeschleunigung von 9,81 m/s² herangezogen.

Die **Bestrahlungsstärke** orientiert sich in den folgenden Experimenten an der Bestrahlungsstärke der Sonne in Erdnähe, also eine Solarkonstante. Im Weltall ist die solare Bestrahlungsstärke abhängig vom Abstand der Sonne. Der sonnennahsten Planeten Merkur wird mit einer Stärke von etwa 9000 W/m² und der sonnenfernsten Planeten Neptun noch mit 1,5 W/m² bestrahlt. Im Labor erfolgt die Bestrahlung durch einen regulierbaren Xenonstrahler. Die Homogenität der Strahlung wurde im effektiven Arbeitsbereich vermessen. Auf der Folienprobenoberfläche weicht die Bestrahlungsstärke örtlich maximal um ± 2,5% vom Mittelwert ab. Die Ergebnisse der Vermessung der Bestrahlungsstärke in der Arbeitsebene sind in Abbildung 3.15

dargestellt. Erst ab einem größeren Radius >160 mm nimmt die Bestrahlungsstärke zum Rand stark ab. Für die späteren Berechnungen wird der Mittelwert der Bestrahlungsstärke in der Arbeitsebene bestimmt. Bei einer gemittelten Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² beträgt der mittlere quadratische Fehler der Einzelmessung etwa ±25 W/m².

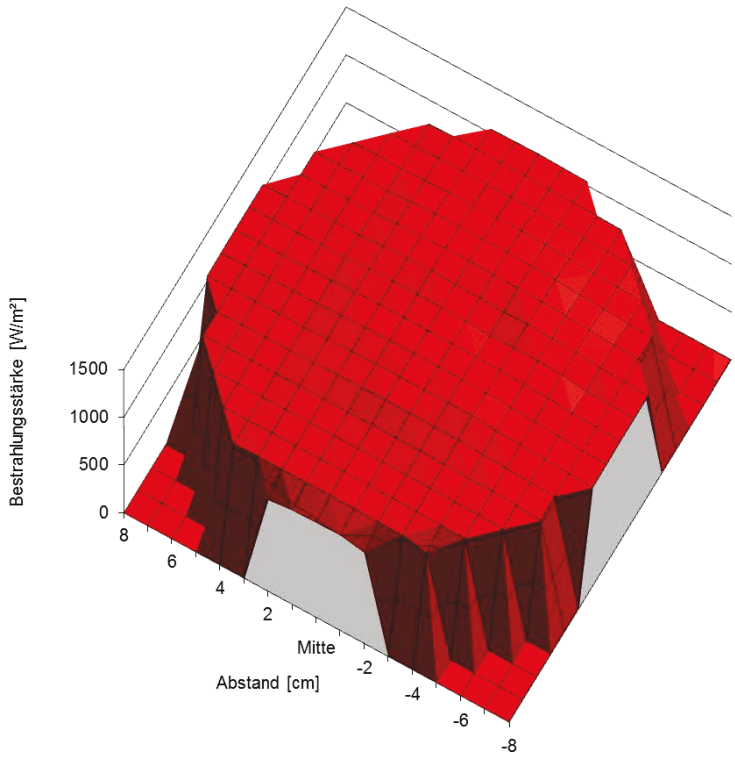

Abbildung 3.15: Verteilung der Bestrahlungsstärke in der Arbeitsebene

Die im Experiment benutzte Folienprobe hat einen Durchmesser von 160 mm und eine kreisförmige **Fläche**. Die Kreisfläche lässt sich mit dem Radius leicht berechnen. Jedoch ist durch den Herstellungsprozess eine Ungenauigkeit zu erwarten. Die Folie wird für die Messung mit acht Löchern versehen, wodurch die Folie an ihrer Halterung befestigt werden kann. Diese Löcher haben einen Durchmesser von zwei Millimeter. Das ergibt insgesamt eine Fläche von etwa 0,000025 m², die von der Folienoberfläche zu subtrahieren ist. Bei der Fertigung der Probe entspricht eine Abweichung des Radius um einen Millimeter einer Fläche von 0,0005 m². Entsprechend dieser Abschätzung wird die Oberfläche mit einer Größe von (0,0201 ± 0,0005) m² beurteilt.
Des Weiteren bewirkt die Unebenheit der Folienoberfläche eine weitere Reduktion der effektiven Fläche. Zum einen ist die Oberfläche der Folienprobe durch Fertigungsprozesse mit leichten Knicken beansprucht, wie bereits in Abbildung 1.4 aufgezeigt wurde. Zum anderen ist die Folienoberfläche durch ihre aufgespannte

Halterung nicht vollkommen straff und somit uneben. Die Folie ist locker an der Halterung befestigt. Für eine Fehlerabschätzung der Auswirkung dieser Unebenheit, wird die Folie als Oberfläche mit Bergen und Tälern betrachtet, wie in Abbildung 3.16 skizziert. Die Strahlung wird an der Folienoberfläche gestreut.

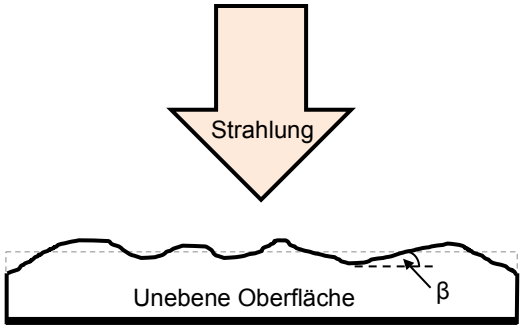

Abbildung 3.16: Skizze einer unebenen Folienoberfläche

Wird die Folie senkrecht bestrahlt, gilt Gleichung (3.2) für die Berechnung des Strahlungsdrucks. Ändert sich der Bestrahlungswinkel, berechnet sich die effektiv bestrahlte Fläche A_{eff} wie folgt

$$A_{\perp} = A_{eff} \cdot \cos\beta. \tag{3.7}$$

Bei einem Winkel von α = 8° entsteht ein Verlust von 1%. Bei kleinen Winkeln, wie sie in dem Experiment zu erwarten sind, ist der Verlust zu vernachlässigen. Die Unebenheit der Folie weist deutlich kleinere Winkel α = 8° auf.
Die Folienproben haben eine Aluminiumbeschichtung und somit einen **Reflexionsgrad** in Abhängigkeit von der Wellenlänge zwischen 0,85 und 0,98. Aufgrund des Reflexionsverhaltens der Probe ist also mit Verlusten durch Absorption und Transmission zu rechnen. Die Messungen des Reflexionsgrads, der mit Aluminium beschichteten Kaptonfolie, ergeben über den gesamt vermessenen Wellenlängenbereich einen Mittelwert von 0,91 ± 0,02.

Als letzte Größe bleibt die Messgröße, die **Masse** *m*, zu betrachten. Die Waage hat laut Datenblatt eine Reproduzierbarkeit von ≤ ± 0,25 µg, welches der üblichen Standardabweichung entspricht. Bei einem zu erwartenden Messwert von etwa 13 µg, wird ein messbedingter Fehler von etwa 1,9% abgeschätzt. Des Weiteren ist eine Linearitätsabweichung von ≤ ± 0,9 µg angegeben. Dieser Wert bezieht sich auf den sogenannten Empfindlichkeitsfehler der Waage, welcher sich nur bei großen Lastenänderungen auswirkt. Bei den kleinen Masseänderungen der Strahlungsdruck-messung ist dieser Wert zu vernachlässigen.
Die Messung der Masse wird nach einer bestimmten Messprozedur unter konstant gehaltenen Messbedingungen mehrfach wiederholt. Dabei werden der Mittelwert sowie der mittlere Fehler der Einzelmessung angegeben.

Tabelle 3.1: Abgeschätzte Fehler der Messgrößen

Messgröße	Messwert	geschätzte Abweichung	erwarteter Fehler
Bestrahlungsstärke [W/m²]	1000	±25	2,50%
Fläche [m²]	0,02010	±0,00005	0,25%
Reflexionsgrad	0,91	±0,02	2,20%
(erwartete) Masse [mg]	0,01300	±0,00025	1,92%
erwarteter Strahlungsdruck P_{S_rech} [10^{-6}N/m²]	6,37	±0,21	3,33%
ermittelter Strahlungsdruck P_{S_gem} [10^{-6}N/m²]	6,34	±0,12	1,94%

In Tabelle 3.1 sind die abgeschätzten Fehler der einzelnen Größen zusammengefasst. Die absoluten Fehler für den ermittelten Strahlungsdruck P_{S_gem} aus der Messung sowie für den erwarteten Strahlungsdruckwert P_{S_rech} aus der Berechnung nach Gleichung (2.25) sind ebenfalls gemäß der Fehlerfortpflanzung bestimmt worden.

3.6 Definition eines Standardmessverfahrens

Die Entwicklung einer Messeinrichtung zur Vermessung des Strahlungsdrucks ist in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben worden. Das Messinstrument, die Präzisionswaage, ist höchst sensibel und weder für Messungen im Hochvakuum noch unter Bestrahlung konzipiert. Um den Strahlungsdruck vermessen zu können, sind die Störeinflüsse betrachtet und technisch eliminiert worden. Dieser Entwicklungsprozess beinhaltet vorrangig die Modifikation der Waage. Neben den technischen und mechanischen Modifikationen der Messeinrichtung gilt es systematische Anforderungen an die Strahlungsdruckmessung zu erfüllen. Diese Anforderungen bedingen eine spezielle Messmethodik, welche in einer Testprozedur zusammengefasst wurde.

Diese Testprozedur des Standardmessverfahrens setzt sich aus verschiedenen Randbedingungen und den daraus resultierenden Parametern zusammen. Die Randbedingungen folgen wiederum aus den oben betrachteten physikalischen Effekten und den Erkenntnissen während der Entwicklung der Messeinrichtung. Dabei ergeben sich weitere Anforderungen an das Messverfahren aus dem Zusammenwirken der einzelnen Komponenten der Messeinrichtung. Zum Beispiel erfährt die kontaminierte Folienprobe einen extremen Impuls, aufgrund des ersten Abdampfens der Moleküle.

Aus den Randbedingungen leiten sich feste Parameter ab. Hier sind zu nennen ein maximaler Umgebungsdruck oder Bestrahlungszeiten und –pausen. Die Vermessung des Strahlungsdrucks bietet überdies einige variable, freie Parameter. Die Bestrahlungsstärke kann zum Beispiel in einem bestimmten Bereich variiert werden.

Die Eigenschaften der Folienproben zählen ebenfalls zu den freien Parametern. Die Probe kann ein anderes Träger- oder Beschichtungsmaterial besitzen oder ihre Oberflächenbeschaffenheit verändern.

3.6.1 Randbedingungen und Parameter

Das standardisierte Messverfahren zeichnet sich durch verschiedene feste sowie frei einstellbare Parameter aus. Die **festen Parameter** ergeben sich aus den Umgebungsbedingungen und den Anforderungen der Messapparatur.

- Die Waage hat einen Wägebereich bis maximal 2,1 g. Die Probe darf dieses Gewicht nicht überschreiten.
- Die Testreihen zeigen eine Temperaturabhängigkeit der Präzisionswaage. Einer der Randbedingungen für eine Strahlungsdruckmessung ist eine konstante Temperierung der Waage. Die Waage hat einen Arbeitsbereich von 10°C bis 30°C. Durch eine Temperierung wird die Waage auf Raumtemperatur (20°C) gehalten.
- Ein weiterer fester Parameter ist der Umgebungsdruck. Aufgrund der störend wirkenden Restgasmoleküle sollte der Druck im Bereich kleiner $5*10^{-7}$ mbar liegen. In Verbindung mit einer definierten Bestrahlungsprozedur kann die Strahlungsdruckmessung auch bei einem Umgebungsdruck von $1*10^{-6}$ mbar durchgeführt werden. Dabei ist bei der Auswertung der Messergebnisse eine weitere Messunsicherheit von etwa 2% zu berücksichtigen.
- Die Dauer der Bestrahlung beeinflusst die störende Wärmeleitung in das Messsystem sowie die Ablagerung der Moleküle auf die Folienprobe. Zur Reduzierung der störenden Effekte wird die Bestrahlungsdauer möglichst verringert. Zur Bestimmung des Strahlungsdrucks beträgt der Zyklus aus Bestrahlungszeit und –pause je eine Minute.

Freie Parameter sind die Bestrahlungsstärke und die Eigenschaften der Folienprobe.

- Die Stärke der Bestrahlung ist nach oben durch die Leistung der Strahlungsquelle begrenzt. Nach unten ist sie durch die Empfindlichkeit der Waage begrenzt, ebenfalls in Abhängigkeit von der Größe der bestrahlten Folienfläche. Bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² auf die hier verwendete Folie misst die Waage eine Masse von etwa $1,3*10^{-9}$ kg. Damit kommt die Waage an der Grenze ihrer Auflösbarkeit von $0,1*10^{-9}$ kg.
- Die maximale Größe der Folienprobe ist durch den maximalen Durchmesser des Lichtstrahls begrenzt. Jedoch kann die Größe der Probenoberfläche verringert werden. Dabei gilt es, die Empfindlichkeit der Waage zu beachten. Eine Reduzierung der Folienoberfläche könnte mit einer Erhöhung der

Bestrahlungsstärke einhergehen. Damit ist die Größe der Fläche ein weiterer freier Parameter, welcher zum Teil an Randbedingungen geknüpft ist.

- Die weiteren freien Parameter beziehen sich ebenfalls auf die Eigenschaften der Probe. Neben der Größe kann das Trägermaterial sowie die Beschichtung der Folie variiert werden. Mehr Einfluss auf die Strahlungsdruckmessung wird eine Variation der Beschichtung haben. Die Beschichtung bestimmt unmittelbar das Reflexionsvermögen der Folie. Nicht nur das Material der Beschichtung, auch die Struktur der Folienoberfläche, kann das Reflexionsvermögen beeinflussen. Zum Beispiel nimmt der Reflexionsgrad der Folie bei vielen Falten und Knicken ab. Die Degradation der Folie durch die langzeitige, intensive Bestrahlung wird das Reflexionsvermögen außerdem stetig verringern.

3.6.2 Vorbereitungen und Justage

Bei dem Prozess der Strahlungsdruckmessung gilt es zunächst einige vorbereitende Maßnahmen zu treffen. Zuerst werden die Elemente des Messsystems in dem Rezipient aufgebaut. Der Spiegel und die Waage werden auf eine Temperierplatte in der Testebene positioniert. Der Solarsimulator wird zum Justieren des Lichtstrahls eingeschaltet. Der Spiegel und die Waage werden dem Strahlengang entsprechend zueinander ausgerichtet, so dass der Lichtstrahl die gesamte Folie bestrahlt. Die Strahlung wird für die Nivellierung und Kalibrierung der Waage abgeblendet. Der Kalibrierungsprozess der Waage verläuft nach der Belastung mit einem 2 g-Kalibriergewicht automatisiert. Zur endgültigen Ausrichtung des Messsystems wird der Spiegel feinjustiert. In der Vorbereitung wird die Bestrahlungsstärke in der justierten Position mit einem Handgerät vermessen. Damit sind die vorbereitenden Arbeiten abgeschlossen. Die genaue Vermessung der Bestrahlungsstärke über die gesamte Fläche passiert nach der Strahlungsmessung.
Der Rezipient wird evakuiert. Die Waage muss bis zu einem Druck von $> 1*10^{-4}$ mbar ausgeschaltet bleiben, da es vorher zu einer Glimmentladung der Elektronik der Waage kommen kann. Der Temperierkreislauf wird ebenfalls erst in diesem Druckbereich aktiviert.
Die Waage wird dann konstant bei einer Temperatur von 20°C gehalten. Bei der Evakuierung wird die Luft in dem Rezipienten zunächst sehr schnell abgepumpt und ein Luftzug entsteht. Diese starke Luftbewegung bringt die Waage aus dem Gleichgewicht. Die Waage passt sich an die neu vorherrschenden Umgebungs-bedingungen an und stabilisiert sich innerhalb von 24 Stunden. Der Prozess der Waagenakklimatisierung passiert gleichzeitig mit der andauernden Evakuierung des Rezipienten.
Um ein möglichst gutes Vakuum zu erreichen, wird der Rezipient ausgeheizt. Bei einem Druck in einem Bereich von 10^{-5} mbar wird die Shroud auf etwa 100°C geheizt. Die auf den Oberflächen des Rezipienten haftenden Moleküle lösen sich und der Druck beginnt zu steigen. Nach einigen Stunden kommt es zu einem

Gleichgewicht, der Druck beginnt zu sinken und die Heizung wird ausgestellt. Der Druck fällt weiter ab.
Zur weiteren Reduzierung des Umgebungsdrucks wird die Shroud mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Somit lässt sich der Druck um eine weitere Größenordnung verringern. Ist ein Druck von $\leq 5*10^{-7}$ mbar erreicht und die Waage stabil, kann prinzipiell die Strahlungsdruckmessung durchgeführt werden.

3.6.3 Drift

Nach den Turbulenzen der Evakuierung nimmt die Waage eine relative Ruhelage ein. In dieser Ruhelage hat die Waage eine leichte Drift. Die Drift ist eine Eigenart der Waage. Sie ist ein Prozess, welcher bei allen Messzyklen auftritt. Die Waage kommt bei konstanten Umgebungsbedingungen zur Ruhe. Das heißt, in einem konstanten Vakuum, mit einer geringen Änderungsgeschwindigkeit des Umgebungsdrucks $\leq 0{,}1*10^{-6}$ mbar/h, und bei konstanter Temperatur stellt sich eine Drift der Waage von etwa 0,001 mg/h ein. Durch die Bestrahlung findet ein geringer Wärmeeintrag in die Waage statt. Eine unbestimmte Drift stellt sich ein.
Als Ruhelage ist eine Drift mit $\leq 0{,}001$ mg/h definiert. Aus dieser Ruhelage wird die Folienprobe zum ersten Mal im Vakuum bestrahlt. Diese erste Bestrahlungseinheit ist erneut mit Turbulenzen behaftet, dem sogenannten ersten Abdampfen.

3.6.4 Erstes Abdampfen

Die, in das Vakuum eingeführte, Folienprobe ist mit mehreren molekularen Schichten Wassermolekülen kontaminiert. Diese Moleküle haften trotz Evakuierung durch die Vakuumpumpen und dem Ausheizprozess des Rezipienten an der Folienoberfläche. Erst bei der Bestrahlung lösen sich die Moleküle schlagartig von der Folie. Abbildung 3.17 zeigt den Verlauf der Masse über die Zeit. Die Waage befindet sich zunächst in einer Ruhelage. Die Folie wird bestrahlt. Die Waage reagiert auf die erste Bestrahlung mit einer extrem hohen Masseänderung bis zu -2,8 mg innerhalb weniger Sekunden. Nach dieser hohen Auslenkung kommt die Waage innerhalb der nächsten neunzig Minuten, unter anhaltender Bestrahlung, wieder annähernd in ihre Ruhelage zurück.

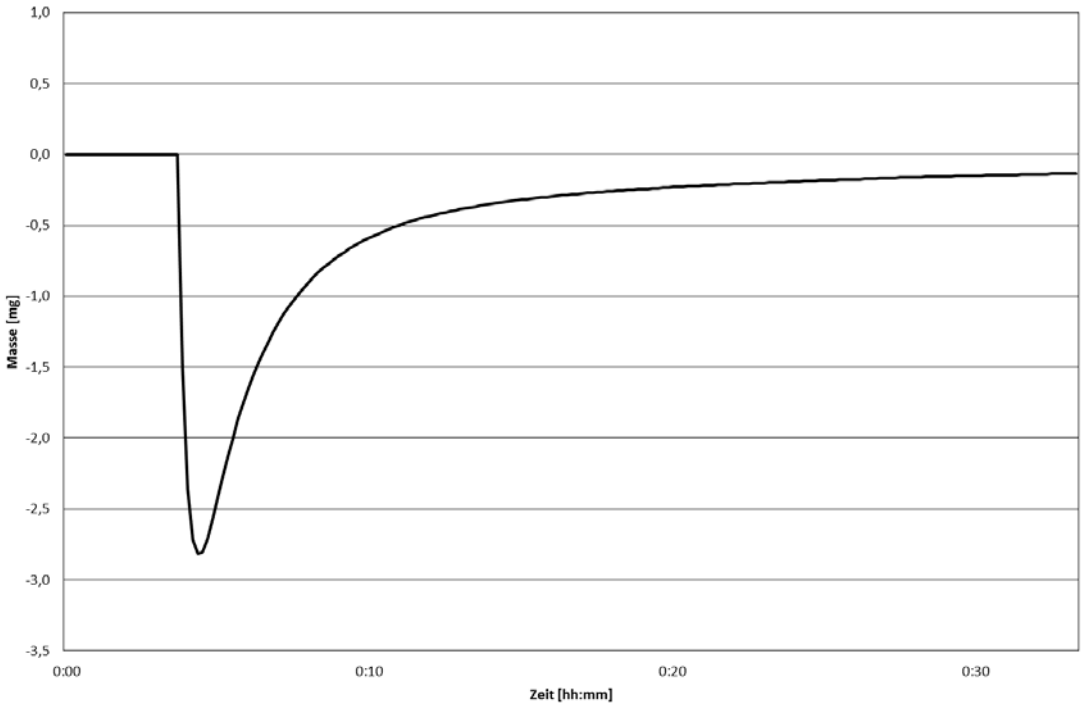

Abbildung 3.17: Reaktion der Waage auf das erste Abdampfen der Moleküle

Die Amplitude des Ausschlags ist schwer abzuschätzen. Die Moleküle bewegen sich unkontrolliert und wechselwirken dabei untereinander. Die Ausschläge infolge erster Bestrahlung liegen in den verschieden Testreihen zwischen 1,4 mg und 2,8 mg.
Vor jedem Bestrahlungszyklus muss die Folie einen ersten Abdampfprozess erleben. Dieser Prozess setzt sich aus einer fünfminütigen Bestrahlungen zusammen, gefolgt von einer entsprechenden Zeitspanne zur Stabilisierung der Präzisionswaage (auf $\leq$ 0,0010 mg/h).

3.6.5 Bestrahlungszyklus

Die Folienprobe wird wie oben beschrieben in das Vakuum eingeführt. Nachdem das System (nach Evakuierung und erster Bestrahlung) wieder in einer Ruhelage ist, beginnt die eigentliche Bestrahlungsmessung. Die Folie wird in mehreren Testzyklen hintereinander immer wieder bestrahlt. Die Bestrahlungsdauer ist mit jeweils einer Minute definiert, gefolgt von einer Bestrahlungspause, die ebenfalls eine Minute andauert. Um die Bestrahlungsprozedur möglichst reproduzierbar durchzuführen, wird der Solarsimulator nicht an- und ausgeschaltet, sondern der Lichtstrahl mit einer Blende unterbrochen. Die Lampe benötigt nach jeder Zündung bis zu dreißig Sekunden um sich zu stabilisieren. Durch das Abblenden des Lichtstrahls kann eine konstante Bestrahlungsstärke in dem gesamten Messzyklus sichergestellt werden.

3.7 Standardarbeitsanweisung (StAA)

In den Testlaboren der Abteilung MTS des DLR in Bremen können verschiedene Umwelt- und Weltraumbedingungen simuliert werden, um die Tauglichkeit von verschiedenen Systemen und Komponenten für die Luft- und Raumfahrt nachzuweisen. Um allen Anforderungen gerecht zu werden und um alle Prüfungen in fachlicher, terminlicher und wirtschaftlicher Hinsicht zur vollen Zufriedenheit der Auftraggeber auszuführen, ist ein Qualitätsmanagementsystem etabliert. Hierbei sind die Anforderungen der DIN EN ISO/EC 17025 (Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien) umgesetzt [55].

Das hier entwickelte Standardmessverfahren zur Strahlungsdruckmessung ist Teil dieses Qualitätsmanagementsystems. Das Messverfahren (inklusive Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Strahlungsdruckmessung) ist in einer Standardarbeitsanweisung definiert und diese ist im Anhang beigefügt.

4. Testreihen

Für die Entwicklung der Messeinrichtung und einer Testprozedur sind verschiedene Testreihen unabdingbar. Die Ergebnisse der Testreihen, die in diesem Kapitel dargestellt werden, geben Aufschlüsse über die Reaktion des Messsystems. Diese Erkenntnisse fließen wiederum in die Testprozedur der bereits beschriebenen StAA ein.
Im folgenden Abschnitt werden die ersten Entwicklungstests beschrieben. Im zweiten Abschnitt wird ein erster Strahlungsdruckmesszyklus dargestellt. Weitere Messreihen mit Variation der Bestrahlungsdauer, Bestrahlungsstärke und des Umgebungsdrucks folgen im dritten Abschnitt.

4.1 Vortests

Bereits in dem ersten Bestrahlungstest ist der Strahlungsdruck nachweisbar. Der Strahlungsdruck ist jedoch stark von Störeffekten überlagert. Abbildung 4.1 zeigt den Verlauf der Masse über die Zeit. In diesem ersten Test wird nur ein Teil der Folienfläche von 0,007 m² mit einer Bestrahlungsstärke von 1400 W/m² bestrahlt.

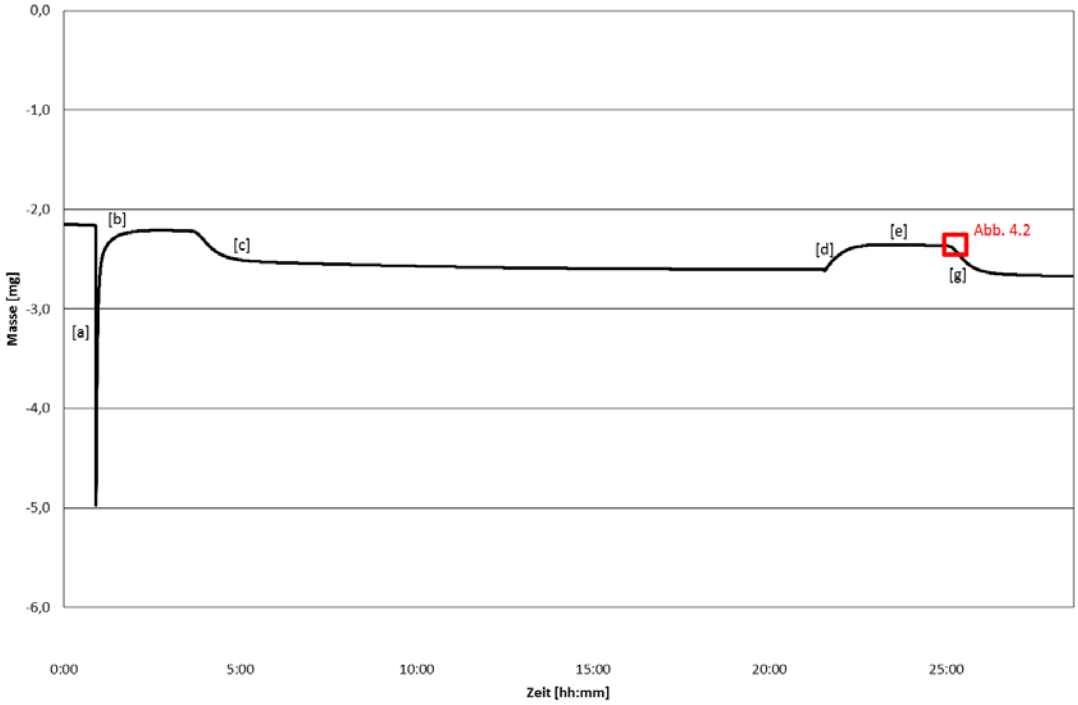

Abbildung 4.1: Masseänderung aufgrund erster Bestrahlung

Der Solarsimulator wird zum ersten Mal eingeschaltet. Die Waage reagiert sofort mit einem Sprung von ca. -2,8 mg [a] auf das erste Abdampfen der Moleküle. Die Waage pendelt sich nach 1,5 Stunden andauernder Bestrahlung auf einen stabilen Wert ein [b]. Die Bestrahlung wird nach drei Stunden beendet. Die Masse fällt über zwei Stunden um etwa 0,3 mg ab und bleibt über mehrere Stunden relativ stabil [c].

Am nächsten Tag wird der Solarsimulator nach ca. 17 Stunden erneut angestellt [d]. Der Solarsimulator wird weitere vier Stunden betrieben. Im Laufe dieser zweiten Bestrahlung steigt die Masse um etwa 0,25 mg an. Das Messsystem kommt in einem stabilen Zustand [e]. Nach dem Abschalten reagiert die Waage direkt auf die fehlende Strahlung und zeigt über 30 Sekunden einen Hub von ca. -0,006 mg [f]. Um diesen Effekt zu betrachten, wird der Ausschnitt aus Abbildung 4.1 in Abbildung 4.2 vergrößert dargestellt. Diese Reaktion zeigt den wirkenden Strahlungsdruck auf die Referenzfolie. Die Folienprobe wird leichter, da nun die Strahlung nicht mehr auf die Folie drückt. Der gemessene Wert kommt der theoretischen Berechnung sehr nahe. Bei idealer Bestrahlung liegt der erwartete Strahlungsdruckwert bei 0,0062 mg. Einige Minuten nach dieser ersten Reaktion der Waage auf die fehlende Strahlung, reagiert die Waage vermutlich auf die Temperaturänderung und fällt in den folgenden zwei Stunden um 0,3 mg [g].

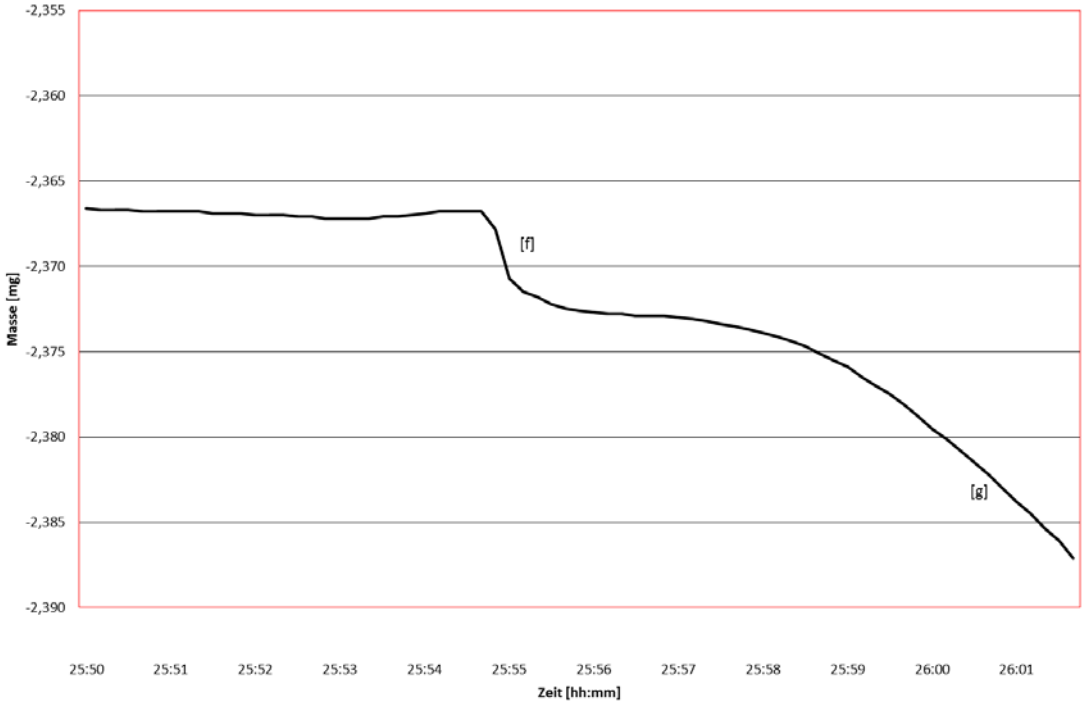

Abbildung 4.2: Masseverlust aufgrund Beendens einer Bestrahlung

Mit dieser ersten Messung ist der Strahlungsdruck bereits nachgewiesen. Die Wirkung des Strahlungsdrucks ist jedoch stark, durch weitere auf die Folie wirkende Kräfte, überlagert. Der gemessene Masseanstieg übersteigt den zu erwartenden Wert um das 50-fache. Eine quantitative Bestimmung des Strahlungsdrucks sowie die Ermittlung des Verlustfaktors sind unter diesen Bedingungen nicht möglich. Erst durch die erfolgreiche Modifizierung der Waage sind folgende Strahlungsmessungen möglich.

4.2 Erster Messzyklus M1

In den folgenden Messzyklen wird eine Folienprobe aus 7,5µm dicker, beidseitig mit 100 nm Aluminium beschichteter Kaptonfolie bestrahlt. Die Oberfläche der Folie

von 0,02 m² ist nunmehr komplett der Bestrahlung ausgesetzt. Diese Folie wird im nachfolgenden als Referenzfolie bezeichnet.

Der erste Messzyklus M1 wird bei dem geringsten erreichbaren Umgebungsdruck von $p_{min} = 3*10^{-7}$ mbar durchgeführt. Die Referenzprobe wird sieben Mal für jeweils eine Minute mit einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² bestrahlt. Zwischen den Bestrahlungen wird der Solarsimulator für jeweils zwei Minuten abgestellt.

Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf des Messzyklus M1. Die Graphik stellt die gemessene Masse über die Zeit dar. Bei Bestrahlung steigt die Masse aufgrund des Strahlungsdrucks um einen nahezu konstanten Wert an [a]. Im Mittel ergibt sich ein Masseanstieg von $\Delta m_+ = 0{,}0127$ mg. Während der 60 Sekunden Bestrahlung steigt der Wert um 0,0002 bis 0,0007 mg leicht an [b]. Wird die Bestrahlung ausgesetzt, fällt der Wert etwa auf den Ausgangswert vor der Bestrahlung zurück [c]. Für einige Sekunden bleibt der Wert konstant, bis die Drift der Waage zum Tragen kommt [d]. Dieser Bestrahlungszyklus wird insgesamt sieben Mal vollzogen.

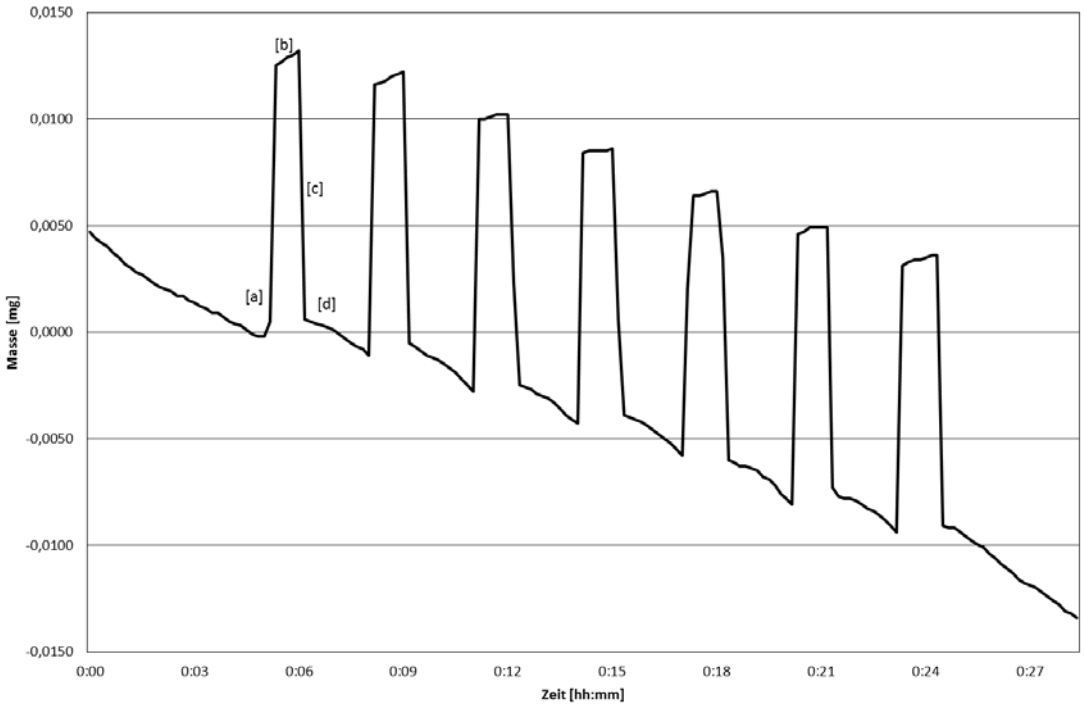

Abbildung 4.3: Masseänderung aufgrund Bestrahlung (M1)

Als Messwert für die Ermittlung des Strahlungsdrucks wird der Masseverlust Δm_- [c] infolge des Beendens einer Bestrahlung definiert. Während die Folie eine Minute bestrahlt wird, desorbieren die auf der Folie haftenden Moleküle. Wird die Strahlung beendet, reagiert die Folie unmittelbar auf den fehlenden Impuls der Photonen, ohne eine Überlagerung der Impulse der desorbierenden Moleküle. Die Masse fällt. Im Gegensatz dazu befinden sich vor der Bestrahlung Moleküle auf der Oberfläche. Der resultierende Massezuwachs Δm_+ ergibt sich nicht nur aus dem Impuls der Photonen. Die Impulse der desorbierenden Moleküle überlagern sich mit den Photonen-

impulsen. Dieser Effekt wird durch die systematischen Anweisungen der Testprozedur weitestgehend reduziert. Jedoch bleiben immer Restmoleküle im Vakuum bestehen, die sich auf Oberflächen ablegen. Die Definition des Messwertes als Masseverlust Δm_- ist eine weitere Methode, um die störende Überlagerung des Messwertes durch die Effekte der Desorption zu verringern.

4.3 Messreihen

In den folgenden Abschnitten werden die Effekte der Desorption der Moleküle betrachtet. Zum Ersten wird in Kapitel 4.3.1 die Bestrahlungsdauer im Experiment variiert. Damit soll ermittelt werden, ab welcher Bestrahlungsdauer die Masseänderung durch Desorption vernachlässigt werden kann. Die Kraftwirkung durch die Masseänderung wird untersucht. Zum Zweiten wird die Abhängigkeit der Krafteinwirkung vom Umgebungsdruck experimentell im Kapitel 4.3.2 ermittelt. Ein Grenzwert für den Umgebungsdruck wird hierbei definiert, ab dem die Nettoimpulsdifferenz der desorbierten Moleküle vernachlässigt werden kann. Darüber hinaus wird im Kapitel 4.3.3 die Kraftwirkung des Strahlungsdrucks bei verschiedenen Bestrahlungsstärken betrachtet.

4.3.1 Variation der Bestrahlungsdauer

Eine Strahlungdruckmessung bei dem Enddruck der SSA von $p_{min} = 3*10^{-7}$ mbar ist äußerst aufwendig. Die Evakuierung inklusive des Ausheizens des Rezipienten und der Kühlung auf kryogene Temperaturen benötigt mehrere Tage. Die Strahlungs-druckmessung soll die Möglichkeit bieten, verschiedene Folienproben zu untersuchen, um vergleichende Analysen anzustellen. Die Randbedingungen für die Testdurchführung, wie die Testdauer, sollten in einem angemessenen Rahmen liegen. Um den zeitlichen und finanziellen Aufwand möglichst zu reduzieren, wird der Strahlungsdruck bei höheren Umgebungsdrücken untersucht und ein Grenzwert für die Strahlungsdruckmessung festgelegt.
Abbildung 4.4 zeigt eine zweite Messreihe M2 bei einem Umgebungsdruck von $p_{Grenz} = 1*10^{-6}$ mbar. Die Referenzfolie wird mit einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² bestrahlt. Die Messreihe ist vergleichbar mit dem zuvor betrachteten Bestrahlungszyklus M1. Die Zyklen weisen dieselben Bestrahlungsintervalle auf. Sie unterscheiden sich durch den Umgebungsdruck und zum Teil durch andere Bestrahlungspausen. Die Referenzfolie wird sechs Mal je eine Minute bestrahlt und darauf zwei Minuten unbestrahlt belassen [I]. Danach wird die Bestrahlung drei Mal im Minutentakt an- und ausgestellt [II].

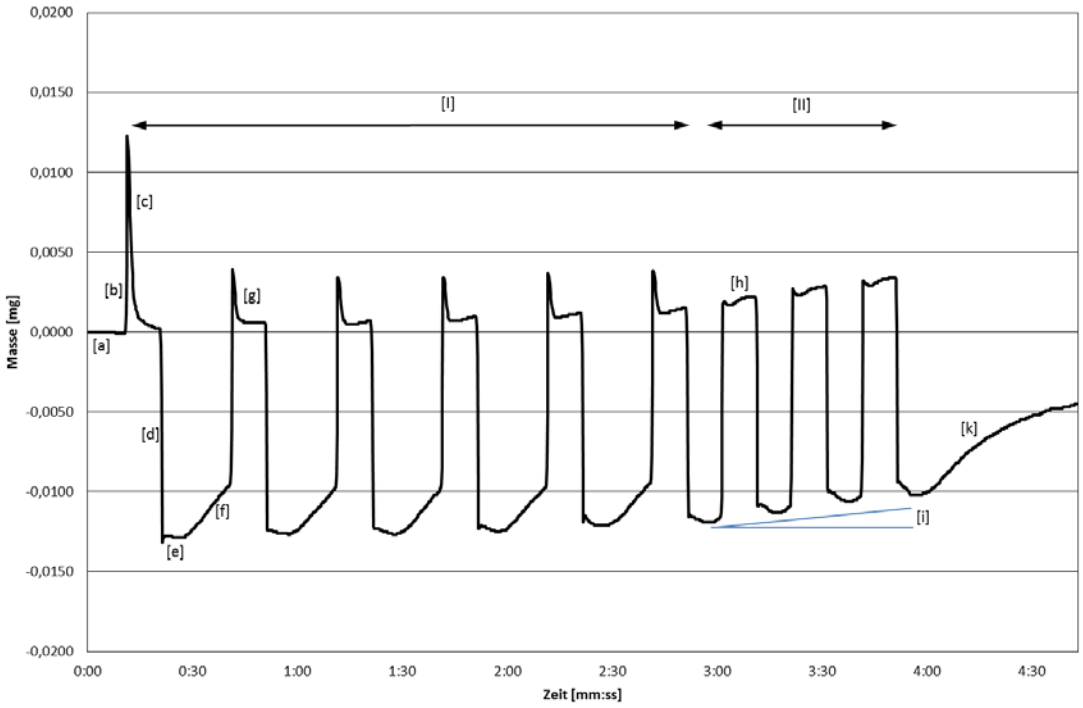

Abbildung 4.4: Masseänderung bei unterschiedlichen Bestrahlungszeiten (M2)

Die Waage befindet sich vor der Bestrahlung in Ruhelage [a]. Zunächst passiert ein Abdampfen der Moleküle. Die Folienprobe erfährt zunächst einen hohen Impuls. Der Impuls der desorbierten Moleküle überlagert sich mit dem Impuls des Strahlungsdrucks. Die Masse steigt an [b]. Infolge der desorbierten Moleküle wird die Folie unmittelbar leichter. Die Masse fällt [c].

Die Referenzfolie wird für eine Minute bestrahlt. Danach wird die Bestrahlung zwei Minuten ausgesetzt, bevor erneut für eine Minute bestrahlt wird. Die Masse der Folie fällt zunächst aufgrund des fehlenden Strahlungsdrucks um $\Delta m_- = 0{,}0128$ mg ab [d]. Innerhalb der nächsten 40 Sekunden bleibt der Wert annähernd stabil [e]. Dann steigt die Masse konstant an [f], bis die Folie erneut bestrahlt wird. Die Wassermoleküle, die sich im Rezipienten befinden, setzen sich erneut auf die Folie nieder. Innerhalb von einer Minute steigt die Masse um 0,003 mg stetig an, dies entspricht einer Masseänderung 0,00005 mg/s.

Bei der zweiten Bestrahlung der Referenzfolie steigt die Masse aufgrund des Strahlungsdrucks um $\Delta m_+ = 0{,}0133$ mg an. Bei andauernder Bestrahlung fällt der Wert innerhalb der nächsten 15 Sekunden um $\Delta m_- = 0{,}0033$ mg ab und bleibt bis zum Ende der Bestrahlung konstant [g]. Der Masseverlust entspricht etwa des Massezuwachses nach der letzten Bestrahlung. In der Graphik zeigt sich dieser Effekt durch einen kleineren Peak [g]. Die Wassermoleküle, welche sich in den 60 Sekunden vor der zweiten Bestrahlung auf die Folie niederlassen, werden von der Folienoberfläche desorbiert.

Nachdem der Solarsimulator die Bestrahlung für weitere zwei Minuten aussetzt, wiederholt sich der Prozess. Zunächst fällt die Masse infolge des fehlenden

Strahlungsdrucks ab. Die Messeinrichtung zeigt für einige Sekunden einen konstanten Wert an, bis der Wert aufgrund der absorbierten Wassermoleküle stetig steigt, solange bis die Bestrahlung wieder einsetzt. Die Masse steigt durch die Bestrahlung der Folie unmittelbar an und fällt wegen der desorbierten Moleküle erneut etwas ab. Sind alle Moleküle desorbiert, stellt sich eine Ruhelage ein. Die Messeinrichtung zeigt annähernd einen konstanten Wert an. Der Einfluss der Desorption ist bei dem tieferen Umgebungsdruck von $p_{min} = 3*10^{-7}$ mbar in M1 nicht vorhanden, siehe Abbildung 4.3.
Nach der sechsten Bestrahlungsfolge wird die Zeitdauer der Bestrahlungspause von zwei auf eine Minute verkürzt. Wie die Graphik zeigt, steigt die Masse aufgrund der Bestrahlung an [h]. Dieser Messwert bleibt für die Dauer der Bestrahlung nahezu konstant. Die Moleküle haben zwischen den Bestrahlungen nicht genug Zeit, um sich auf die Folie zu legen. Wird die Folie nach einer Minute wieder bestrahlt, steigt die Masse entsprechend des Strahlungsdrucks an und bleibt in etwa konstant. Die Waage misst keinen Masseverlust, da es nicht genug Moleküle zu desorbieren gibt. Dieses Bestrahlungsintervall wird drei Mal wiederholt. Die Messung ist reproduzierbar.
Besonders innerhalb der letzten Bestrahlungseinheiten fällt eine zunehmende Drift auf [i]. Diese Drift entsteht vermutlich infolge eines Wärmeeintrags in das Wägesystem, durch die intensivere Bestrahlung der Folie innerhalb der letzten zehn Minuten des Messzyklusses.
Nach der letzten Bestrahlung zeigt sich wieder die Absorption von Wassermolekülen [k]. Der Massewert steigt über ca. sieben Stunden um $\Delta m_{+} = 0{,}022$ mg an. Nach den sieben Stunden kommt die Messeinrichtung zur Ruhe mit einer Änderungsgeschwindigkeit <0,0005 mg/h. Am nächsten Tag wird die Folie erneut bestrahlt. Die erste Bestrahlung hat einen Masseverlust von $\Delta m_{-} = 0{,}025$ mg zufolge. Dieser Wert stimmt annähernd mit dem Masseanstieg nach der letzten Bestrahlung überein.

4.3.2 Variation des Umgebungsdrucks

Wie zuvor bereits nachgewiesen, ist der Desorptionseffekt abhängig vom Umgebungsdruck. Diese Abhängigkeit wird im Folgenden genauer untersucht. Je sieben Messergebnisse der zuvor aufgeführten Messreihen M1 und M2 sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Zusätzlich wurde der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt. Die Bestrahlungsstärke ist in allen Messzyklen konstant mit 1000 W/m². Die Messreihen unterscheiden sich nur durch einen anderen Umgebungsdruck.

Tabelle 4.1: Vergleich der Massendifferenzen infolge Bestrahlung bei unterschiedlichen Drücken

Messreihe	**Massendifferenz [mg]**							**Mittelwert $\Delta\dot{m}$ [mg]**	**Standard-abweichung [±mg]**
M1	0,0127	0,0129	0,0127	0,0125	0,0126	0,0126	0,0128	0,01268571	0,00013452
M2	0,0128	0,0128	0,0129	0,0131	0,0129	0,0131	0,0130	0,01294286	0,00012724
Zyklus	1	2	3	4	5	6	7		

Die sieben Messwerte aus M1 bei einem Umgebungsdruck von $p_{min} = 3*10^{-7}$ mbar ergeben einen Mittelwert von $\Delta m_{-} \approx 0{,}0127$ mg. Mit dem erhöhten Umgebungsdruck in M2 von $1*10^{-6}$ mbar ergibt sich ein Mittelwert von $\Delta m_{-} \approx 0{,}0129$ mg. Die Ergebnisse stimmen nahezu überein. Die Massendifferenzen liegen bei dem höheren Umgebungsdruck im Mittel um 2,03% über den Ergebnissen bei dem minimalen Umgebungsdruck.
Um die Auswirkungen des Desorptionseffekts weiter zu untersuchen, werden weitere Messzyklen durchgeführt. In folgenden Testreihen wird nur der Umgebungsdruck weiter variiert. Die Referenzprobe wird in dieser Messreihe mit einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² bestrahlt.

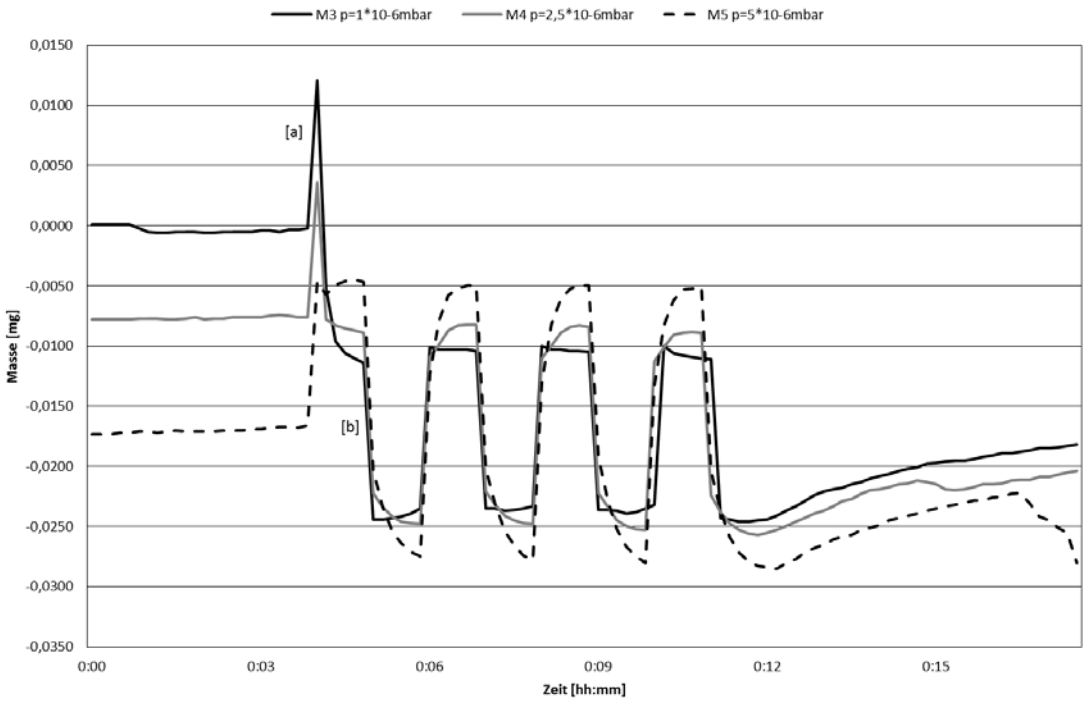

Abbildung 4.5: Masseänderung in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck (M3, M4, M5)

Abbildung 4.5 zeigt die drei Messzyklen M3 bis M5, in denen der Umgebungsdruck stetig erhöht wurde. Diese drei unmittelbar nacheinander durchgeführten Messzyklen sind in dieser Graphik übereinander gelegt worden, um die einzelnen Messwerte miteinander vergleichen zu können. Als Referenzmessung dient die Messreihe M3 bei einem Umgebungsdruck $1*10^{-6}$ mbar. Bei diesem Druck ist der Desorptionseffekt, wie zuvor beschrieben, zu vernachlässigen. Bei der ersten Bestrahlung wird die Folie von den anhaftenden Wassermolekülen befreit. Dieser Effekt stellt sich in der Graphik als steile Amplitude dar [a]. Dabei steigt die Masse aufgrund des Strahlungsdrucks unmittelbar an. Die Energie der Strahlung löst jedoch auch die Moleküle von der Folienoberfläche und die Folienprobe wird leichter. Durch die kontinuierliche Bestrahlung, beginnt sich die Waage auf einen konstanten Wert einzustellen. Nach einer Minute wird die Bestrahlung ausgesetzt, und die Masse fällt entsprechend dem fehlenden Strahlungsdruck ab [b]. Der Messzyklus setzt sich aus vier Bestrahlungseinheiten von jeweils einer Minute Bestrahlung und Bestrahlungspause zusammen. Die Messsignale stellen annähernd ein Rechtecksignal dar.
Der Umgebungsdruck wird in dem nächsten Messzyklus M4 auf $p_{M4} = 2{,}5*10^{-6}$ mbar erhöht. Die vier Bestrahlungseinheiten werden wiederholt. Im nächsten Schritt wird der Druck auf $p_{M5} = 5*10^{-6}$ mbar erhöht und bei gleichbleibendem Bestrahlungsprozess Messreihe M5 aufgenommen. Die Abbildung zeigt deutlich einen Anstieg der Massendifferenz bei steigendem Umgebungsdruck. In Abbildung 4.5 fällt außerdem auf, dass die Messsignale sich einer Sinuskurve annähern. Die Werte steigen nicht unmittelbar auf einen konstanten Wert an. Dieser Effekt nimmt ebenfalls mit steigendem Druck zu.

Tabelle 4.2: Masseänderungen durch Bestrahlung (1000 W/m²) bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken

Messreihe	Umgebungsdruck p [mbar]	Massendifferenz Δm [mg]				Mittelwert $\Delta\dot{m}$ [mg]
M1	$0{,}3*10^{-6}$					**0,012686**
M2	$1{,}0*10^{-6}$					**0,012943**
M3	$1{,}0*10^{-6}$	0,0130	0,0131	0,0131	0,0132	**0,013100**
M4	$2{,}5*10^{-6}$	0,0133	0,0139	0,0138	0,0135	**0,013625**
M5	$5{,}0*10^{-6}$	0,0156	0,0152	0,0142	0,0153	**0,015075**
M6	$8{,}8*10^{-6}$	0,0169	0,0173	0,0175	0,0175	**0,017300**
M7	$15{,}0*10^{-6}$	0,0218	0,0213	0,0226	0,0229	**0,022150**

Die einzelnen Messwerte sowie die entsprechenden Mittelwerte der Messreihen M1 bis M7 sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Die Werte aus M3 sind unter denselben Randbedingungen wie die drei letzten Zyklen der Messreihe M2 gemessen worden.

Sie weisen dieselbe Charakteristik und Größenordnung auf. Neben den drei oben beschriebenen Messreihen wurden zwei weitere Messzyklen M6 und M7 durchgeführt.

4.3.3 Variation der Bestrahlungsstärke

Im folgenden Abschnitt wird die Wirkung des Strahlungsdrucks bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken untersucht. Zunächst werden in einem Langzeittest insgesamt 87 Messwerte bei konstanten Bedingungen aufgenommen. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Bei einem Umgebungsdruck von $p_{Grenz} = 1*10^{-6}$ mbar wird die Referenzfolie mit einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² bestrahlt [53].

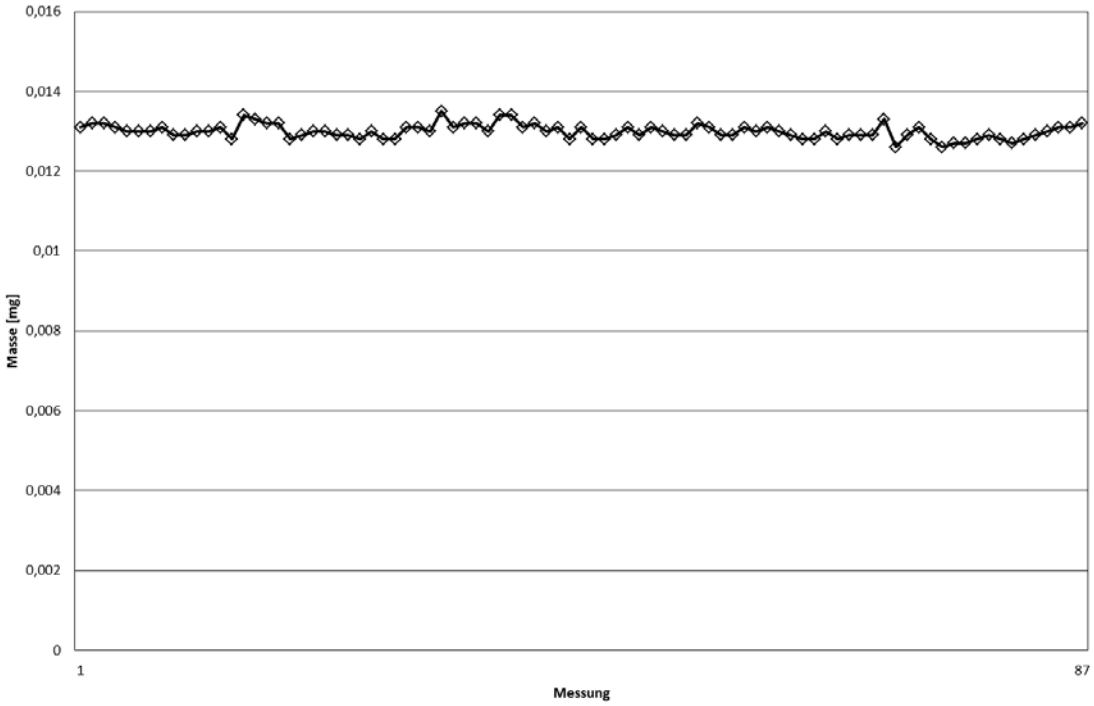

Abbildung 4.6: 87 Messergebnisse bei $p_{Grenz} = 1*10^{-6}$mbar mit 1000 W/m²

Die 87 Messwerte liegen in einem Messbereich zwischen 0,0125 und 0,0135 mg. Der Mittelwert beträgt $(0{,}01300 \pm 0{,}00018)$ mg. Abbildung 4.6 zeigt eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse auf.

Zur weiteren Untersuchung wird die Referenzfolie verschiedenen Bestrahlungsstärken ausgesetzt. Die Bestrahlungsdauer und -pause beträgt weiterhin eine Minute, der Umgebungsdruck beträgt weiterhin $1*10^{-6}$ mbar. In einem ersten Messzyklus wird die Referenzprobe zuerst mit $W_1 = 1000$ W/m² bestrahlt. Danach wird die Bestrahlungsstärke auf ein stabiles Minimum von $W_{min} = 880$ W/m² geregelt. Die folgende Abbildung 4.7 zeigt den direkten Vergleich der Messergebnisse infolge der Bestrahlung bei unterschiedlichen Intensitäten.

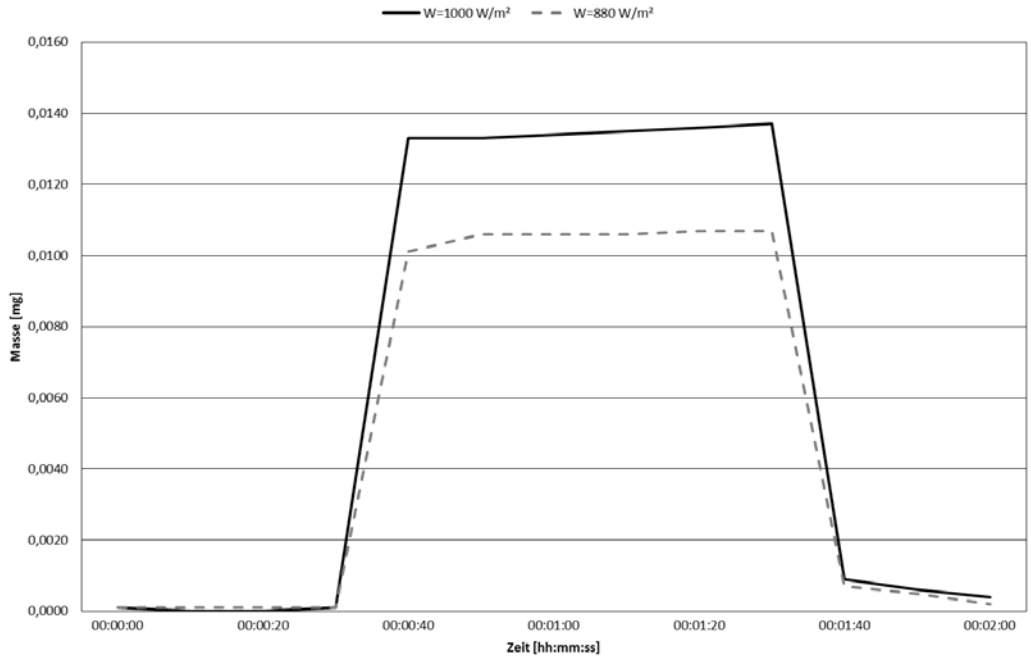

Abbildung 4.7: Vergleich verschiedener Bestrahlungsstärken

Wie in Abbildung 4.7 zu erkennen, nimmt die Masse mit steigender Bestrahlungsstärke zu. Bei der reduzierten Bestrahlungsstärke liegt die gemittelte gemessene Massendifferenz bei $\Delta m_{min} = (0{,}01125 \pm 0{,}00007)$ mg. Die Messungen werden bei einer dritten Bestrahlungsstärke $W_2 = 920 W/m^2$ wiederholt. Der Mittelwert dieser Messungen liegt bei $\Delta m_2 = (0{,}01217 \pm 0{,}00005)$ mg. In der folgenden Abbildung 4.8 sind die Ergebnisse der einzelnen Messungen bei den verschiedenen Bestrahlungsstärken zusammengefasst.

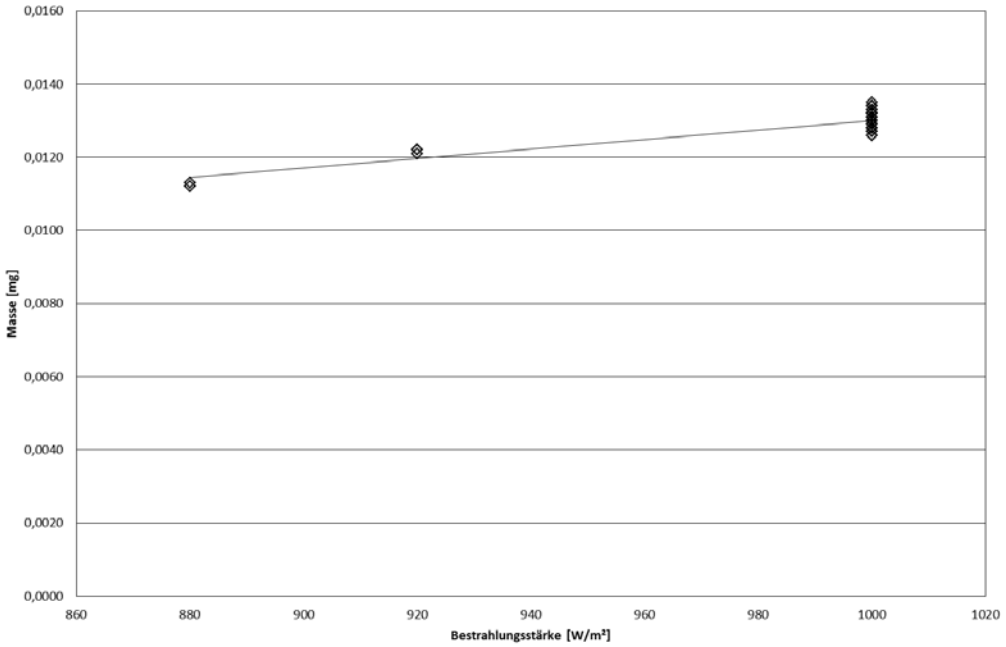

Abbildung 4.8: Bestrahlung mit unterschiedlichen Bestrahlungsstärken

In Abbildung 4.8 ist deutlich zu erkennen, dass die resultierende Kraft aufgrund des Strahlungsdrucks mit steigender Bestrahlungsstärke zunimmt. Die Steigung der Trendlinie beträgt 0,0013 mg / 100 W/m².

5. Auswertung

Ein erstes Teilergebnis ist die Entwicklung der Messeinrichtung zur Bestimmung des Strahlungsdrucks. Ergänzend zu der Messeinrichtung ist eine Standard-arbeitsanweisung nach den Anforderungen des Qualitätsmanagementsystems des DLR entwickelt worden. Eines der primären Ziele dieser Forschungsarbeit ist die Analyse der Reaktion einer Segelfolie auf Bestrahlung im Vakuum. Der Strahlungsdruck ist quantifiziert worden. Im folgenden Abschnitt werden die Resultate dieser experimentellen Strahlungsdruckmessungen aufgeführt und diskutiert. Zuletzt werden die Störeinflüsse der Desorption erneut betrachtet, nunmehr mit der Absicht die Auswirkungen auf reale Sonnensegel zu erörtern.

5.1 Entwicklung eines Messstands im Hochvakuum

Bereits vor über 100 Jahren hatten sich Lebedew sowie Nichols und Hull den technischen Herausforderungen der sensiblen Strahlungsdruckmessung gestellt. Vor allem die Einflüsse der Restgasmoleküle wirken sich störend auf die Strahlungsdruckmessung aus. Die Auswirkung der radiometrischen Kraft hat Lebedew bereits als störende Überlagerung des Strahlungsdrucks gemessen [15]. Der Fortschritt im Bereich der Vakuumtechnik erleichtert die Umsetzung eines sensibleren Messaufbaus. Durch die stetige Reduzierung des Drucks kann der Radiometereffekt zunächst in den durchgeführten Messreihen eliminiert werden. Die Auswirkung der radiometrischen Kräfte überlagert jedoch nicht nur die Wirkung des Strahlungsdrucks, sondern auch die Wirkung der optischen Desorption. Die Energie der Photonen löst die Moleküle von der Folienoberfläche, wodurch diese ihren Impuls auf die Folie übertragen. Dieser Effekt ist ebenfalls umgebungs-druckabhängig und mit der entwickelten Messeinrichtung nachzuweisen. In der Testprozedur sind eine kurzzeitige Bestrahlungseinheit von maximal einer Minute und ein Umgebungsdruck $p_{Grenz} \leq 1*10^{-6}$ mbar definiert. Die störenden Einflüsse aufgrund der Restgasmoleküle liegen unter diesen Randbedingungen bei 2,03%. Diese Abweichung ist als gering bewertet. Die Abweichung liegt in derselben Größenordnung wie der abgeschätzte zu erwartende Messfehler des Messsystems von 1,94%. Mit hohem zeitlichem Aufwand kann der Umgebungsdruck zur Durchführung der Strahlungsdruckmessung weiter reduziert werden. In den Messreihen ist nachgewiesen, dass ab einem Umgebungsdruck $\leq 5*10^{-7}$ mbar die störende Auswirkung der Restgasmoleküle zu vernachlässigen ist. Unter Abwägung des Aufwands wird der als gering eingestufte Fehler infolge des höheren Umgebungsdrucks in Kauf genommen. In der Standardarbeitsanweisung werden die zwei Varianten der Messdurchführung aufgezeigt. Je nach Bedarf kann entweder die aufwendigere und exaktere Messung bei einem Umgebungsdruck $\leq 5*10^{-7}$ mbar durchgeführt werden oder die vereinfachte Messprozedur bei $1*10^{-6}$ mbar. In der

zweiten Variante sind die Messergebnisse jedoch infolge des Desorptionseffekts mit einer größeren Unsicherheit behaftet.
Die Restgasmoleküle sind nicht die einzige Quelle störender Einflüsse. Die Präzisionswaage erfährt durch die Bestrahlung eine thermische Belastung. Dieser thermische Störeffekt ist bei der Entwicklung der Messeinrichtung systematisch untersucht worden. Die Maßnahmen zur Eliminierung der thermischen Belastung sowie weiterer Störeffekte sind ebenfalls in der Testprozedur definiert worden. Die Strahlungsdruckmessung nach dieser Prozedur führt zu qualitativ hochwertigen Ergebnissen, welche im nächsten Abschnitt diskutiert werden.

5.2 Ergebnisse der Testreihen

Zunächst wird die Auswirkung der optischen Desorption analysiert. Die daraus abgeleiteten Maßnahmen zur Abschätzung und Eliminierung der störenden Einflüsse bestimmen die Prozedur der weiteren Testreihen.

5.2.1 Desorption

Nicht nur die Photonen, auch die desorbierten Moleküle werden von der Waage erfasst. In der zweiten Messreihe M2 findet eine Bestrahlung von einer Minute statt, gefolgt von zwei Minuten Bestrahlungspause. In dieser Pause setzen sich die Moleküle wieder auf der Folienoberfläche nieder. Die Masse steigt um 0,003 mg. Um die Masse eines Wassermoleküls zu ermitteln, wird die mittlere Masse eines Teilchens m_0 betrachtet. Diese steht mit der Stoffmenge n und der molaren Masse M in folgendem Zusammenhang

$$\mathrm{m_0} = \mathrm{n}\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{N_A}} = \mathrm{M_r} \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\mathrm{kg}\,, \qquad (5.1)$$

wobei N_A die Avogadro-Konstante darstellt. Mit einer relativen molaren Masse $M_r = 18$ von Wasser ergibt sich eine Masse von $2{,}99 * 10^{-26}$ kg für ein Wassermolekül. Unter der Annahme, dass der Massezuwachs von 0,003 mg rein aufgrund der Ablagerung von Wassermolekülen resultiert, entspricht das einer Wägung von etwa 10^{17} Wassermolekülen. Entsprechend den Abschätzungen im zweiten Kapitel enthält eine Monolage Wasser 10^{18} bis 10^{19} Moleküle pro m². Damit enthält eine Monolage auf der Folienoberfläche von 0,02 m² etwa 10^{16} bis 10^{17} Wassermoleküle. Der Massezuwachs von 0,003 mg lässt auf die Adsorption von etwa einer Monolage Wasser schließen.
Nach der letzten Bestrahlung des Messzyklus M2 steigt die Masse der Folienprobe über sieben Stunden um 0,022 mg an. Als die Folie am nächsten Tag erneut bestrahlt wird, zeigt die Waage einen Masseverlust von 0,025 mg an. Diese Masse entspricht etwa einer Menge von 10^{18} Wassermolekülen.

Im thermodynamischen Gleichgewicht treffen die Moleküle bei einem Druck p_V auf eine Festkörperoberfläche. Die spezifische Wandstoßrate υ_A gibt die Anzahl der Moleküle an, die bei einem bestimmten Druck pro Zeiteinheit auf eine bestimmte Fläche auftreffen. Die spezifische Wandstoßrate υ_A ist gegeben durch

$$\upsilon_A = \frac{p_V}{\sqrt{2\pi m_0 kT}}. \quad (5.2)$$

Die Wandstoßrate ist weiterhin abhängig von der Temperatur T und der mittleren Masse eines Teilchens m_0, wie in Gleichung (5.1) bereits beschrieben. Die Wandstoßrate für Wasser bei Raumtemperatur ist somit:

$$\upsilon_A = 3{,}73 \cdot p_V\,[mbar] \cdot 10^{20} \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}. \quad (5.3)$$

Bei einem Druck von $p_V = 1*10^{-6}$ mbar treffen auf jeden Quadratzentimeter pro Sekunde noch $3{,}7*10^{14}$ Moleküle auf. Eine Monolage Wassermoleküle entspricht etwa einer Anzahl von 10^{14} bis 10^{15} Moleküle pro cm². Aus Gleichung (5.3) lässt sich ableiten, dass es bis zu 30 Sekunden dauern kann, bis sich erneut eine monomolekulare Schicht gebildet hat. Bei einem Druck von $p_V = 1*10^{-7}$ mbar bleibt die Folie für 30 bis 300 Sekunden frei.

Die Messwerte aus M2 weisen eine Ablagerung der Moleküle auf der Folienprobe nach. Die Masse von $3{,}7*10^{14}$ Wassermolekülen entspricht etwa $1{,}11*10^{-11}$ kg. Unter dieser Annahme und dem Ergebnis aus Gleichung (5.3), würde mit jeder Sekunde auf einer Oberfläche von 0,02 m² eine zusätzliche Masseänderung von 0,00222 mg gemessen werden. Tatsächlich wird ein Massezuwachs von 0,00005 mg/s gemessen. Dieser Messwert ist um den Faktor 44 kleiner als das theoretisch abgeschätzte Ergebnis. Dieser Faktor ist im Verhältnis zu der Größenordnung der hohen Anzahl der Moleküle gering. Die Messwerte bestätigen somit die Abschätzung als eine gute Darstellung des physikalischen Prozesses.

Um die Auswirkung des Desorptionseffekts weiter abschätzen zu können, wird die Strahlungsdruckmessung bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken durchgeführt. Das Ziel dieser Analyse ist es den Grenzwert für den Umgebungsdruck zu definieren, ab welchem die optische Desorption zu vernachlässigen ist.
Abbildung 5.1 stellt die Reaktion der Moleküle und der Waage infolge einer Bestrahlung schematisch dar. Zur Darstellung des Prozesses werden die Moleküle in einzelnen Zeitabschnitten betrachtet.
Vor Beginn eines Bestrahlungszyklus liegen Moleküle auf der Folienoberfläche. Zum Zeitpunkt t_0 wird mit der Bestrahlung der Folie begonnen. Durch die Bestrahlung überlagern sich mehrere Effekte. Zum einen überträgt der Strahlungsdruck der Photonen eine Kraft auf die Folie. Diese Kraft wird durch die Waage als Massezuwachs gemessen [a]. Über die Zeitdauer der Bestrahlung bleibt diese Kraftwirkung konstant [b]. Wird die Bestrahlung unterbrochen (t_{off}), stellt sich die Ausgangsmasse ein [c]. Dieses Verhalten sollte die Messwerterfassung als ein Rechtecksignal darstellen. Die Messreihe M1 bestätigt dieses Messverhalten, wie in Abbildung 4.3 zu erkennen.
Der zweite und dritte Effekt resultieren aus der Desorption der im unbestrahlten Zustand anhaftenden Moleküle. Zum einen desorbieren die Moleküle bei einer Bestrahlung von der Folienoberfläche. Sie üben somit ebenfalls einen Impuls auf die Folienoberfläche aus. Zum anderen verursachen die desorbierten Moleküle aufgrund

der Masseänderung einen messbaren Masseverlust. Nach vorangegangenem ersten Abdampfen der störenden Moleküle und einem Umgebungsdruck $\leq 5*10^{-7}$ mbar sind so wenig Moleküle auf der Folienoberfläche, dass die Bewegung der Moleküle durch die Messung nicht mehr erfasst werden kann. **Der Desorptionseffekt ist somit bei niedrigem Umgebungsdruck zu vernachlässigen.**
Die in Abbildung 5.1 schematisch dargestellte Masseänderung resultiert somit ausschließlich aus dem Strahlungsdruck.

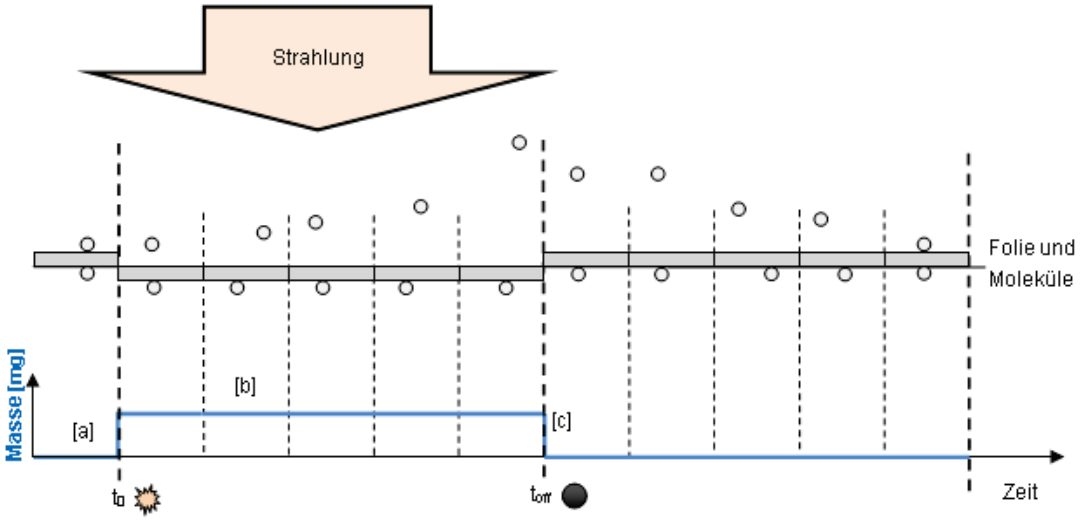

Abbildung 5.1: Masseänderung aufgrund Bestrahlung bei **$0,3*10^{-6}$mbar**

Mit steigendem Umgebungsdruck steigt die Moleküldichte. Auf der Folienoberfläche lagern sich, wie in Gleichung (5.3) ablesbar, mehr Moleküle an. In der schematischen Darstellung der Abbildung 5.2 ist der erhöhte Umgebungsdruck durch eine Molekülschicht auf der Folie angedeutet.
Bei einem Umgebungsdruck von $1*10^{-6}$ mbar überlagert sich der Massezuwachs aufgrund des Strahlungsdrucks mit der Masseänderung durch die desorbierten Moleküle.
Die Auswirkung des resultierenden Impulses durch die desorbierten Moleküle zu Beginn der Bestrahlung ist weiterhin minimal und überlagert sich mit der resultierenden Masseänderung.

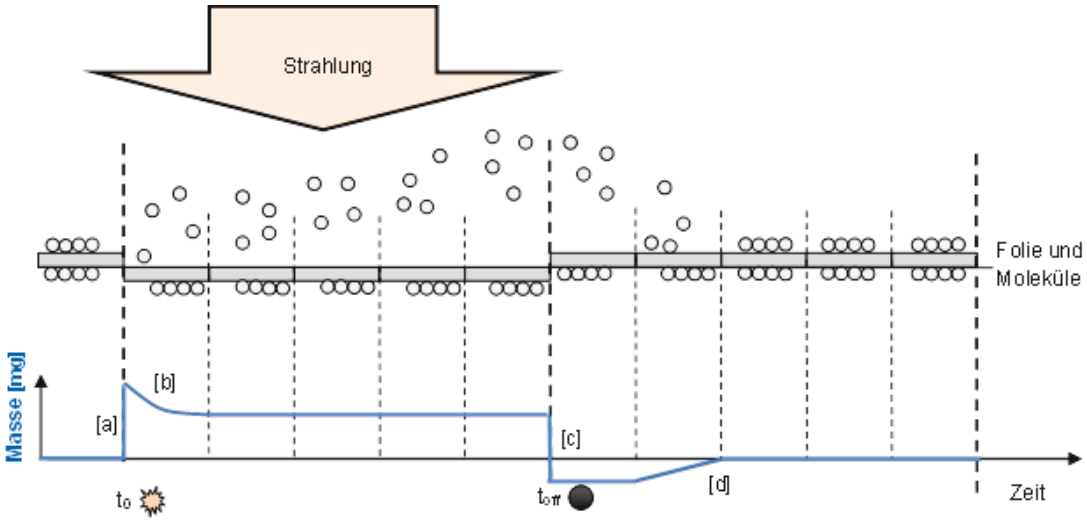

Abbildung 5.2: Masseänderung aufgrund Bestrahlung bei **$1{,}0*10^{-6}$mbar**

Durch die erste Bestrahlung bei t_0 bewirkt der Strahlungsdruck zunächst einen Massezuwachs [a] und die Desorption der anhaftenden Moleküle. Durch die zahlreichen desorbierten Moleküle erfährt die Folie einen kurzzeitigen Desorptionsimpuls und einen Masseverlust [b]. Nach diesem Desorptionseffekt bleibt der Messwert bei andauernder Bestrahlung konstant. Wird die Bestrahlung unterbrochen, fällt die Masse aufgrund des fehlenden Strahlungsdrucks [c] und bleibt in der Folge zunächst konstant. Nach der Bestrahlung adsorbieren erneut Moleküle auf die abkühlende Folienoberfläche, was zu dem erkennbaren Masseanstieg führt [d].

Der Desorptionseffekt wird durch Variation der Bestrahlungsdauer weiter untersucht. Bei einer Bestrahlungsdauer von einer Minute, gefolgt von einer unbestrahlten Phase von ebenfalls einer Minute, ist der Effekt der Masseänderung durch die desorbierenden Moleküle vernachlässigbar. Wie in Messreihe M2 (Abbildung 4.4) zu erkennen ist, haben die Moleküle nicht genug Zeit, sich wieder auf die Oberfläche zu legen.

Um die Auswirkung der optischen Desorption zu demonstrieren, werden kurze Bestrahlungszyklen von einer Minute bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken durchgeführt. Dieser Vergleich ist in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt. **Mit einer Umgebungsdruckerhöhung von $\leq 5*10^{-7}$ mbar auf $1*10^{-6}$ mbar steigt die Massendifferenz um 2,03% an.**
Zusätzlich zum Impuls der Photonen übt die Menge der desorbierten Moleküle kurzzeitig einen Impuls auf die Folienprobe aus. Die desorbierten Moleküle erhöhen die Dichte der Restgasatmosphäre in Foliennähe. Somit ergibt sich eine Erhöhung des Umgebungsdrucks, welches wiederum eine zusätzliche Kraftwirkung aufgrund des radiometrischen Effekts zur Folge hat.

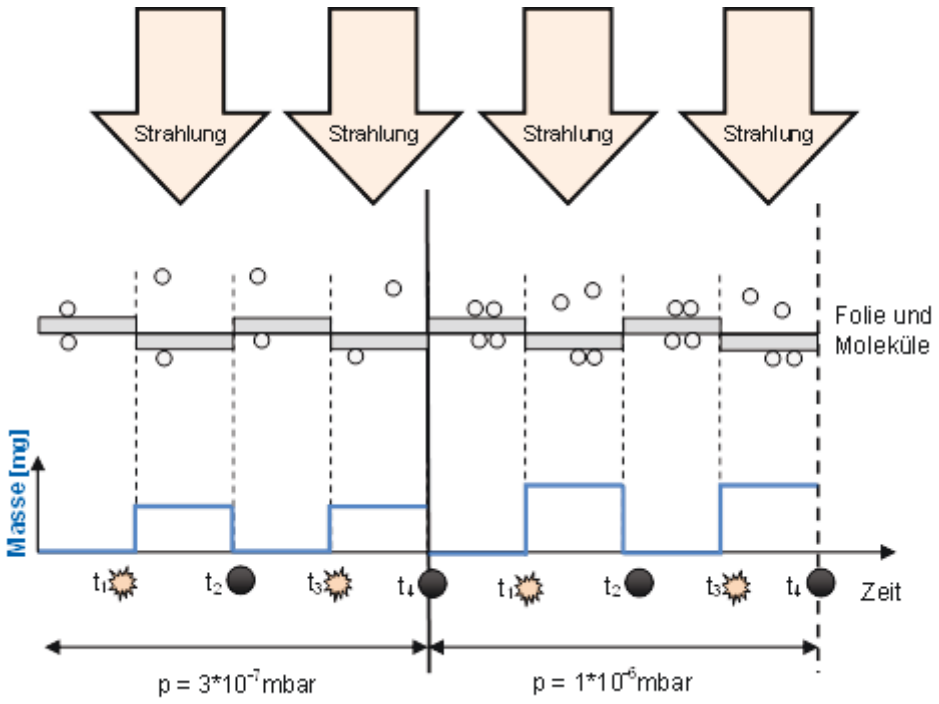

Abbildung 5.3: Masseänderung aufgrund Bestrahlung bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken

Wird der Umgebungsdruck weiter erhöht, steigt auch die Wirkung des Desorptionseffekts. Die Messwerte steigen infolge Bestrahlung mit 1000 W/m² bei wachsendem Umgebungsdruck stetig an. Dieser Anstieg ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

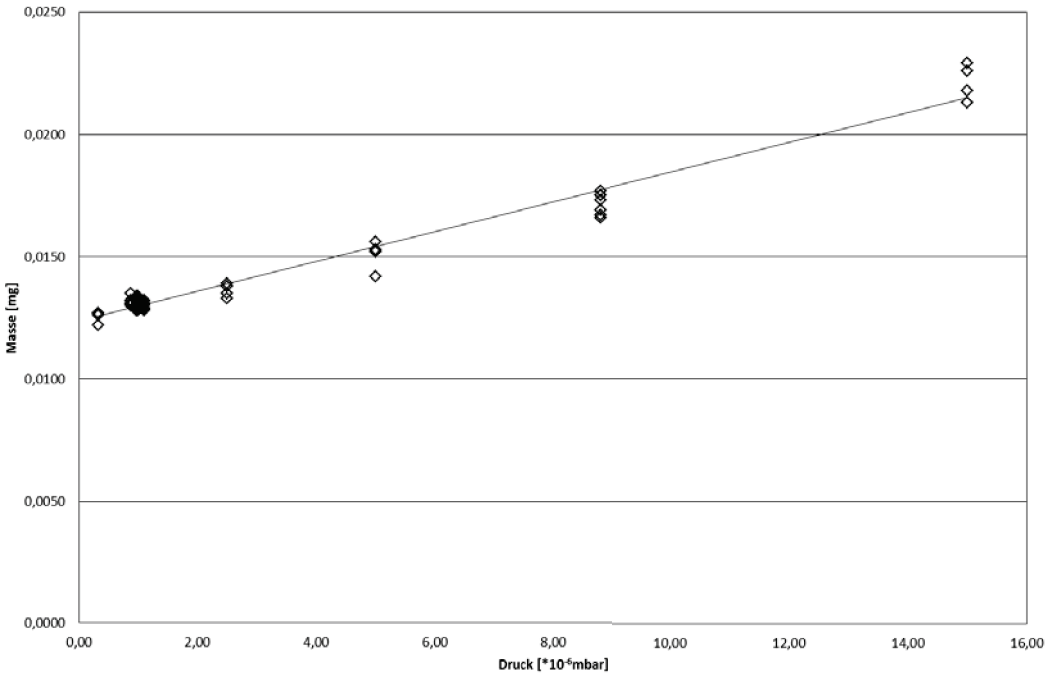

Abbildung 5.4: Masseänderung in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck

In Abbildung 5.5 ist die Masseänderung infolge der Bestrahlung bei einem Umgebungsdruck von $15*10^{-6}$ mbar schematisch dargestellt.
Trotz der geringen Bestrahlungsdauer und -pause entsteht bei diesem hohen Umgebungsdruck eine messbare Kraftwirkung durch die Impulse der desorbierten Moleküle. Mit Gleichung (5.3) und den bewerteten Folgerungen, setzen sich in den Bestrahlungspausen nach wenigen Sekunden bereits die Molekülmenge einer Monolage auf der Folie ab. In dieser kurzen Bestrahlungspause haben die Moleküle jedoch nicht genug Zeit um den Ausgangszustand zu erreichen.
Durch die Bestrahlung lösen sich die Moleküle der oberen Folienfläche vollständig. Ein kurzzeitiger Desorptionsimpuls entsteht und die desorbierten Moleküle übertragen ihren Impuls entsprechend des radiometrischen Effekts ebenfalls auf die Folie. Diese beiden Impulse überlagern sich mit den Impulsen der Photonen und führen somit zu einer Überhöhung des zu erwartenden Messwerts.
Die Masseänderung ist in Abbildung 5.5 durch einen sinusförmigen Verlauf der Masseänderung dargestellt, welche auch in den Messreihen M4 bis M7 nachgewiesen ist, wie in Abbildung 4.5 aufgezeigt.

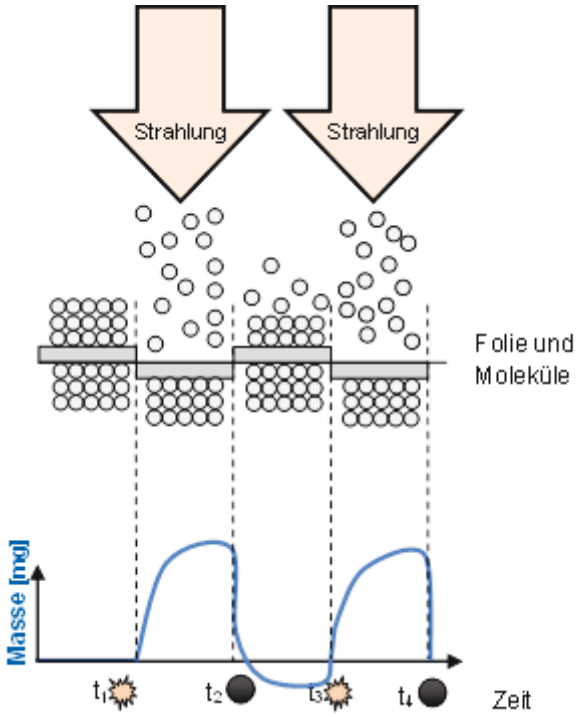

Abbildung 5.5: Masseänderung aufgrund Bestrahlung bei **$15*10^{-6}$mbar**

Aus den zuvor betrachteten Abschätzungen und den Ergebnissen der Strahlungsdruckmessungen wird ein Umgebungsdruck $\leq 5*10^{-7}$ mbar definiert, ab welchem der Strahlungsdruck unverfälscht zu messen ist, gekoppelt mit einer definierten Bestrahlungseinheit von je einer Minute Bestrahlung und Pause. In dieser Umgebung sind nicht genug Moleküle vorhanden, um sich in dieser Zeit auf der Folienoberfläche abzusetzen. Der Desorptionseffekt ist bei diesen Randbedingungen zu vernachlässigen.

5.2.2 Quantifizierung des Strahlungsdrucks

Die erste Messreihe wurde bei einem Umgebungsdruck von **$3*10^{-7}$ mbar** durchgeführt. Aus den sieben Messzyklen ergibt sich eine gemittelte Massendifferenz von

$$\Delta\dot{m} = (0{,}01268571 \pm 0{,}00013452)\ \text{mg}.$$

Nach der Gleichung (3.2) kann der Strahlungsdruck durch den Messwert bestimmt werden. Zusammen mit einer Größe der bestrahlten Fläche von

$$A = (0{,}0201 \pm 0{,}0005)\ \text{m}^2$$

ergibt sich der Strahlungsdruck zu

$$P_{S_gem} = 6{,}19*10^{-6}\ \text{N/m}^2$$

mit einem relativen Fehler von 2,7%.

Nach der Gleichung (2.25) kann der erwartete Strahlungsdruck bestimmt werden. In die Berechnung fließen die Bestrahlungsstärke mit

$$W = (1000 \pm 25)\ \text{W/m}^2$$

und der Reflexionsgrad mit

$$\rho = 0{,}91 \pm 0{,}02$$

ein. Der erwartete Strahlungsdruck berechnet sich somit zu

$$P_{S_rech} = 6{,}37*10^{-6}\ \text{N/m}^2$$

mit einem relativen Fehler von 3,3%.

Der ermittelte Strahlungsdruck aus der Messung weicht nur um **2,8%** von dem erwarteten Wert nach der Gleichung (2.25) ab.

In einer Langzeitmessung sind 87 Messwerte bei konstanten Bedingungen und einem Umgebungsdruck von **$1*10^{-6}$ mbar** aufgenommen worden. Der Mittelwert beträgt

$$\Delta\dot{m} = (0{,}00130 \pm 0{,}00018)\ \text{mg}.$$

Damit ergibt sich ein Strahlungsdruck von

$$P_{S_gem} = 6{,}34*10^{-6}\ \text{N/m}^2$$

mit einem relativen Fehler von 2,9%.

Dieser Wert weicht nur um **0,4%** von dem erwarteten Wert nach Gleichung (2.25) ab. Der aus den Messungen ermittelte Wert ist mit einer etwas größeren Messunsicherheit behaftet. Zusätzlich dazu sind die Messwerte der Langzeitmessung bei dem definierten Grenzdruck von $1*10^{-6}$ mbar erfasst worden. Somit sind zu der Messunsicherheit noch die 2,03% Abweichung aufgrund des Desorptionseffekts zu berücksichtigen. Wird der Strahlungsdruck, welcher aus den gemessenen Daten ermittelt wird, mit dem erwarteten Strahlungsdruck nach der Gleichung (2.25) verglichen, sind die 2,03% von der im direkten Vergleich ermittelten Abweichung abzuziehen, wie in folgender Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Ermittelte Strahlungsdrücke im Verhältnis zum erwarteten Strahlungsdruck ($P_{S_rech} = 6{,}37*10^{-6}$ N/m²)

Messreihe	Umgebungs-druck p [mbar]	ermittelter Strahlungsdruck P_{S_gem} [10^{-6}N/m²]	relativer Fehler	Abweichung vom berechneten Strahlungsdruck P_{S_rech}
M1	$0{,}3*10^{-6}$	6,19	2,7%	-2,8%
M2	$1{,}0*10^{-6}$	6,31	2,7%	(-0,9%) -2,9%
Langzeit	$1{,}0*10^{-6}$	6,34	2,9%	(-0,4%) -2,4%

Wie zuvor beschrieben, sind die Ergebnisse der vergangenen Versuche unter anderem von Lebedew mit Abweichungen von bis zu 20% vom erwarteten Wert nach Maxwell und Bartoli behaftet. Selbst die aktuellste Messung der NASA ermittelt in ihrer Testreihe einen Strahlungsdruck mit einer Abweichung von 6,4% zum erwarteten Wert. Die Ergebnisse der Vermessung des Strahlungsdrucks dieser Dissertation weichen nur um 2,4% bis 2,9% des erwarteten Werts ab. Die Strahlungsdruck-messung erweist sich somit als sehr genau.
Die im dritten Kapitel betrachtete **Fehlerabschätzung** ermittelt einen relativen Fehler von 1,94% für die Masse. Die Messunsicherheit der Ergebnisse liegt in einem Bereich von 2,7% bis 2,9%. Selbst bei völliger Ausschaltung aller systematischen Fehlerquellen, wie zum Beispiel der Inhomogenität der Bestrahlung, ergeben sich bei mehrmaliger Messung nie genau übereinstimmende Messergebnisse. Die Messwerte streuen um den wahren Wert. Dieser zufällige Fehler aus den Testreihen addiert sich zu dem abgeschätzten, relativen Fehler. Durch die häufige Wiederholung der Messungen sollten sich diese Fehler verringern lassen. Wie in Tabelle 5.1 dargestellt, entsprechen die ermittelten Daten nicht dieser Annahme. Beim Messen von 87 Werten liegt der absolute Fehler mit 2,9% sogar am höchsten. Jedoch ist dieser Fehler bei dem hochsensiblen Messsystem als sehr gering einzuschätzen. Die Messungen des Marshall Space Flight Centers, mit einem ähnlichen Versuchsaufbau, erzielen eine Messunsicherheit ihrer Messwerte von 12%.

Mit den ermittelten Werten wird der **Verlustfaktor** aus Gleichung (3.6) betrachtet. In Messreihe M1 ergeben sich die Verluste, inklusive der Reflexionsdegradation nach der Gleichung (3.5), aus den zuvor dargestellten Werten zu

$$(1+\rho-V_F) = 1{,}85613$$

mit einem Fehler von 2,8%.
Mit einem Reflexionsgrad von

$$\rho = 0{,}91 \pm 0{,}02$$

lässt sich der Verlustfaktor bestimmen zu

$$V_F = 0{,}054 \pm 0{,}020.$$

Durch die ermittelten Daten aus Messreihe M1, kann somit auf Verluste von (5,4 ± 2,0)% geschlossen werden. Diese Verluste liegen hauptsächlich in der nicht idealen Oberfläche begründet sowie der Degradation des Reflexionsgrades durch die Bestrahlung. Eine weitere Komponente der Verluste könnte sich auch aus der Inhomogenität der Strahlungsquelle ergeben.
Bei den Berechnungen der computergestützten Flugbahnsimulationen fließt zum großen Teil die Biegung der Folie, infolge Bestrahlung, in den abgeschätzten Wirkungsgrad der Folienoberfläche ein. Durch die relativ kleine Fläche der Probe sind die Auswirkungen der Oberflächenbiegung in der Strahlungsdruckmessung zu vernachlässigen und fließen nicht in den ermittelten Verlustfaktor ein. Außerdem ist zu beachten, dass die Degradation durch die Konfektionierungsprozesse und durch dauerhafte solare Bestrahlung noch nicht berücksichtigt ist. Die Berechnungen der Flugbahnmodelle gehen von einem Wirkungsgrad zwischen 0,95 und 0,8 aus [2, 6]. Unter Betrachtung der zuvor beschriebenen bisher unberücksichtigten Degradations-effekten bestätigt der ermittelte Verlust mit etwa 5% die Annahmen des Wirkungsgrads als eine gute Abschätzung.

Zuletzt ist mit der verifizierten Messeinrichtung die Auswirkung dreier **verschiedener Bestrahlungsstärken** untersucht worden. Abbildung 4.7 zeigt zwei reproduzierbare Rechtecksignale infolge der Bestrahlung mit zwei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken. Die Ergebnisse der Bestrahlungen sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Die Abweichung zum berechneten Strahlungsdruck liegt zwischen 2,4% und 4,1%, wobei die Abweichungen wegen der Desorption bereits berücksichtigt sind. Auffällig ist dabei, dass bei dem Bestrahlungszyklus mit einer Bestrahlungsstärke von 920 W/m² der erwartete Wert sogar überschritten wird. Diese Übersteigung liegt zum einen in der hohen Genauigkeit der Messung begründet, zum anderen an der Messwerterhöhung um etwa 2% durch störende Überlagerungen der Impulse, infolge des Desorptionseffekts bei einem Umgebungsdruck von $1*10^{-6}$ mbar. Die Abweichungen liegen im Bereich der Messunsicherheit.

Tabelle 5.2: Abweichung der gemessenen von der berechneten Massendifferenz bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken

Bestrahlungs-stärke [W/m²]	mittlere Massendifferenz $\Delta\dot{m}$ [mg]	ermittelter Strahlungsdruck P_{S_gem} [10^{-6}N/m²]	berechneter Strahlungsdruck P_{S_rech} [10^{-6}N/m²]	Abweichung vom berechneten Strahlungsdruck
880	0,0113	5,49	5,61	(-2,1%) -4,1%
920	0,0122	5,94	5,86	(+1,3%) -0,7%
1000	0,0130	6,34	6,37	(-0,4%) -2,4%

Die Steigung der Trendlinie aus Abbildung 4.8 beträgt 0,0013 mg / 100 W/m². Der entsprechende rechnerische Wert liegt bei 0,0014 mg / 100 W/m². Die Ergebnisse der Messung stimmen annähernd mit den erwarteten Werten überein.

5.3 Auswirkungen der Störeffekte

5.3.1 Erstes Abdampfen im Weltall

Durch das erste Abdampfen im Vakuum, infolge der ersten Bestrahlung der Folie, zeigt sich eine heftige Reaktion der Waage. Dieser störende Effekt beschränkt sich jedoch nicht auf die Wirkung des Strahlungsdrucks unter Laborbedingungen. Eine Segelfolie, die ins Weltall transportiert wird, wird ebenfalls mit Wassermolekülen kontaminiert sein. Wird die Folie im Orbit entfaltet und von der Sonne bestrahlt, lösen sich die Moleküle von der Oberfläche und das Segel erfährt einen starken Impuls. Der Impuls ist nach ersten Abschätzungen etwa 100- bis 200-mal so hoch, wie der Impuls durch den Strahlungsdruck der Sonne in Erdnähe. Dieses Ergebnis sollte in die Betrachtung des Entfaltungsprozesses eines Sonnenseglers einfließen. Die Problematik eines unkontrollierten, ungewollten Schubs durch ein definiertes Entfalten könnte gezielt genutzt werden, indem dieser Impuls weiter analysiert wird. Der Effekt des ersten Abdampfens wirft folgende Fragen für die Entfaltung eines Sonnensegels auf:

- Sollte ein Segel direkt nach der Entfaltung beide Segelseiten der Sonnenstrahlung ausgesetzt werden, um die Wassermoleküle zu desorbieren?
- Wird eine Folienseite dauerhaft von der Sonne bestrahlt, werden sich keine Moleküle auf die Oberfläche absetzen. Wie verhält sich die unbestrahlte Folienseite?
- Ein Raumfahrzeug hat immer eine Atmosphäre aus desorbierenden Molekülen der Materialien um sich herum. Adsorbieren diese Moleküle im Laufe der Mission an den Segeloberflächen?

5.3.2 Desorption nicht nur als Störeffekt

Die Restgasmoleküle erweisen sich als störende Begleiter der Strahlungsdruck-messung. Der Effekt der optischen Desorption dieser Moleküle ist für die erfolgreiche Durchführung der Strahlungsdruckmessung detailliert untersucht worden. Die für die Messung entwickelte Testprozedur definiert größtenteils Randbedingungen, um die Auswirkung der optischen Desorption zu minimieren. Jedoch kann dieser Effekt auch für künftige Sonnensegelanwendungen genutzt werden. Der Impuls, der desorbierenden Moleküle, kann für den Antrieb eines Sonnenseglers eingesetzt werden. Die Folie könnte dafür mit geeigneten Molekülen beschichtet werden. Für die Auswahl dieser Beschichtung müsste zunächst die Bindungsenergie der Moleküle betrachtet werden. Eine mögliche Beeinträchtigung des Reflexionsgrads müsste ins Verhältnis zu dem zusätzlichen Impuls gebracht werden.

2004 hatten Gregory und James Benford die Idee, Sonnensegelfolien mit Molekülschichten zu versehen, bereits als thermische Desorption diskutiert. In ihren Ausführungen gehen sie von einer 1000-fachen Verstärkung des Antriebs als Startschub aus. Dieser Schub wird benötigt, um von einer erdnahen Umlaufbahn, Low Earth Orbit (LEO), auf eine interplanetare Flugbahn zu gelangen. Die Sonnensegel werden von der Erde aus mit Mikrowellen bestrahlt Damit würden Temperaturen bis zu 1000°C erreicht werden, um mehrere Molekülschichten von den Folien zu desorbieren [56].
Mit der Entwicklung der Strahlungsdruckmesseinrichtung ist die Grundlage für eine Charakterisierung von realen Sonnensegeln geschaffen. Bei einem möglichen Auswahlprozess für eine optimale Beschichtung kann die Strahlungsdruckmessung bestmöglich unterstützen, um die theoretischen Daten durch Messwerte zu verifizieren.

6. Zusammenfassung

Die Strahlungsdruckmessung ist Teil der Entwicklung eines innovativen Weltraumantriebs. Dabei werden Raumfahrzeuge mit einem Sonnensegel ausgestattet. Ein solches Sonnensegel ist eine große Konstruktion aus einer aufgespannten, extrem dünnen Folie, welche einen hohen Reflexionsgrad besitzt. Bei Bestrahlung im Weltraum treffen die solaren Photonen auf die Folienoberfläche und übertragen einen Impuls. Durch den Impuls auf die Folie und die daraus resultierende Kraft kann das Sonnensegelsystem gezielt vorangetrieben werden. Trotz einer relativ kleinen Krafteinwirkung können im Vergleich zu herkömmlichen Raumfahrantrieben, akkumuliert über genügend lange Zeiträume hohe Geschwindigkeiten erreicht werden. So werden Langzeit- und Tiefraummissionen möglich, die mit heutigen, chemischen Antriebstechniken nicht zu realisieren sind. Bis zur vollen Einsatzreife des Sonnensegelantriebs sind jedoch noch vielfältige verfahrenstechnische Entwicklungsschritte zu vollziehen. Ein Teilbereich dieser erforderlichen Forschung stellt die Vermessung des Strahlungsdrucks auf dünne Folien unter Weltraumbedingungen dar.
Die Ermittlung des Strahlungsdrucks ist eine anspruchsvolle technische Herausforderung. Die äußerst geringe Kraft, welche der Strahlungsdruck auf eine reflektierende Oberfläche von einem Quadratmeter ausübt, liegt im Mikronewton Bereich.

Um diese geringen Kräfte analysieren zu können, ist im Rahmen dieser Forschungsarbeit ist eine Messeinrichtung konstruiert worden. Als Messapparatur wird eine Präzisionswaage verwendet, welche die hohen messtechnischen Anforderungen erfüllt. Die dafür benötigte Waage ist ein sensibles Labormessgerät, welche durch die Bestrahlung im Vakuum verschiedenen Störeinflüssen ausgesetzt ist. Umgebungsdruckänderungen, thermische, elektrostatische und optische Einflüsse sowie die Tauglichkeit der verarbeiteten Materialien wurden analysiert. Die Präzisionswaage wurde den Anforderungen entsprechend konfektioniert.

Um den Strahlungsdruck störungsfrei erfassen zu können, wurde neben dem technischen Aufbau, auch eine Testprozedur entwickelt. Die Notwendigkeit dieser Testprozedur ergibt sich hauptsächlich aus den störenden Einflüssen der Restgasmoleküle und dient der Optimierung der Testabläufe. Um diese Effekte abschätzen zu können, ist die optische Desorption im Messsystem detailliert analysiert worden. Dabei stellt sich heraus, dass die Desorption nicht nur ein störender Einfluss der Strahlungsdruckmessung im Labor ist. Die Wirkung der Moleküle muss ebenfalls bei der Umsetzung der Sonnensegeltechnologie berücksichtigt werden.

Eine Standardarbeitsanweisung ist entworfen worden, welche die Randbedingungen definiert und die Arbeitsabläufe der Messung in der SSA detailliert beschreibt. Dieses Dokument beschreibt die einzelnen Arbeitsschritte während der Testvorbereitung und des Aufbaus sowie den Testablauf. Außerdem wird die Methodik zur Auswertung der Daten festgelegt. Das zweite Ziel dieser Dissertation ist somit ebenfalls erreicht.

Nach dieser Testprozedur wurden verschiedene Messreihen durchgeführt. Die Messdaten dienen unter anderem der Validierung der Messeinrichtung mit den theoretisch zu erwartenden Werten. Wie erforderlich, wurde der Strahlungsdruck in den Messreihen reproduzierbar ermittelt. Aus den gemessenen Masseänderungen wird ein Strahlungsdruck ermittelt, der nur um 2,9% von dem berechneten Strahlungsdruck von Maxwell und Bartoli abweicht. Verschiedene Parameter, wie die Bestrahlungsstärke und Bestrahlungsdauer, sind in den Testreihen variiert worden. Die Bestrahlungsstärke ist nach Maxwells und Bartolis Formel direkt proportional zum Strahlungsdruck. Diese Abhängigkeit wurde in der Messung nachgewiesen. Durch diese Forschungsarbeit ist es gelungen, erste Messwerte zu generieren, um die Bahnberechnungen einer potentiellen Sonnensegelmission zu verifizieren. Die bisherigen Annahmen und groben Abschätzungen möglicher Verluste, bei der realen Kraftwirkung auf ein Sonnensegel, können durch die Messwerte überprüft werden. Die Verluste durch die zeitabhängige Degradation des Reflexionsgrads bei andauernder Bestrahlung werden in der Strahlungsdruck-messung direkt gemessen.

6.1 Ausblick

Die ermittelten Daten bilden die Grundlage für eine Charakterisierung von Segelfolien. Die entwickelte Messeinrichtung kann verschiedene Folienproben vermessen. Ein Vergleich dieser Messdaten könnte die Entscheidung unterstützen, welche Folie für eine geplante Sonnensegelmission die geeignetste ist. Außerdem können vorkonfektionierte Folienproben untersucht werden, zum Beispiel Folien mit einer speziellen Beschichtung, gefaltete oder definiert degradierte Folien.
Die Abteilung MTS hat neben der Weltraumsimulationsanlage, welche in dieser Arbeit beschrieben ist und genutzt wurde, noch eine weitere Bestrahlungs-einrichtung. Diese komplexe Bestrahlungsanlage (KOBE) dient der experimentellen Untersuchung der Degradation von Materialien unter simulierten Strahlungs-bedingungen des Weltraums jenseits eines erdnahen Orbits. Drei Lichtquellen und ein Protonen-/Elektronenbeschleuniger sind mit einer Bestrahlungskammer verbunden, in der Proben einer genau definierten Dosis elektromagnetischer Strahlung sowie Elektronen und Protonen ausgesetzt werden können. Die KOBE ist in der Lage, Folienproben zu bestrahlen, um eine Degradation durch Langzeiteinwirkung der solaren Strahlung zu simulieren [41]. Durch die Bestrahlung von Aluminium beschichteten Kaptonfolien in der KOBE ist die Entstehung von

kleinen Bläschen im Bereich von 0,1 Mikrometer nachgewiesen. Durch Rekombinationsprozesse der freien Elektronen in der Aluminiumschicht mit den eingestrahlten Protonen entstehen Wasserstoffatome. Die Wasserstoffbläschen besiedeln nach andauernder Bestrahlung die gesamte Oberfläche, wodurch der Wirkungsgrad η der Folie zusätzlich reduziert wird [58].

Das gezeigte Standardmessverfahren bezieht sich auf eine Testdurchführung in der SSA. Die Strahlungsdruckmessung in der SSA ist sehr aufwendig. Um den nötigen Enddruck zu erreichen, sind kosten- und zeitintensive Maßnahmen erforderlich. Außerdem ist diese Vakuumanlage für diese Art von Messung technisch nicht gut geeignet. Der Solarsimulator ist durch seine begrenzte Leistungsstärke und eingeschränkten Strahlungsdurchmesser nur bedingt einsatzfähig. Der Rezipient sollte für die Messung ein wesentlich kleineres Volumen aufweisen. Ein kleinerer Rezipient hätte den Vorteil, dass dieser schneller evakuiert werden kann. Das würde die Vorbereitungszeit für die Strahlungsdruckmessung stark verringern. Außerdem führt die Umlenkung des Strahlengangs durch den Spiegel zu Verlusten der Bestrahlungsstärke und sollte ebenfalls vermieden werden. Durch den hohen Aufwand der Durchführung einer Strahlungsdruckmessung ist bereits eine alternative Messmethode betrachtet worden. Eine Umsetzung der Idee hat durch die Konstruktion des Messstands „Lichtdruckmessstand (LiMes)“ bereits begonnen und ist in Abbildung 6.1 skizziert. Die Planung und die Konstruktion, siehe Abbildung 6.2, richten sich speziell an die Anforderungen der Strahlungsdruckmessung. Die modifizierte Waage als Messinstrument ist das Kernstück des LiMes.

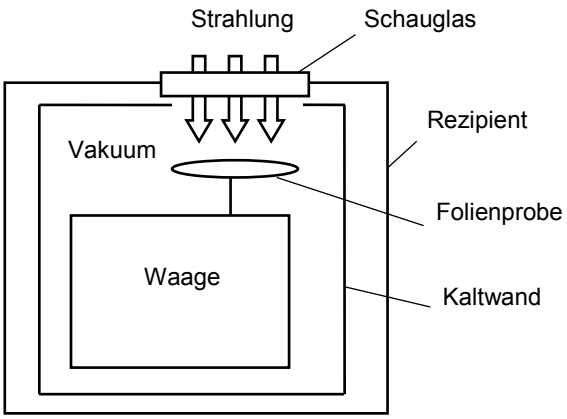

Abbildung 6.1: Schematischer Messaufbau LiMes

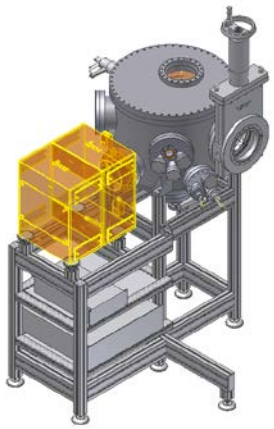

Abbildung 6.2: LiMes [59]

Der neue LiMes wird ausgelegt für ein stabiles Hoch- bis Ultrahochvakuum. Der Umgebungsdruck sollte für die Testdurchführung mindestens im Bereich von $1*10^{-7}$ mbar liegen. Die Möglichkeit besteht einen Enddruck von $1*10^{-9}$ mbar zu erreichen. Der Rezipient wird so klein wie möglich konzipiert. Durch das kleine Volumen reduziert sich die Auspumpzeit auf wenige Stunden. Der Rezipient wird so entworfen, dass der Solarsimulator direkt von oben auf die Folienprobe strahlt. Der

Solarsimulator wird dementsprechend mit einer vertikalen Strahlungsrichtung ausgewählt. Auf die Umlenkung des Strahlengangs mittels eines Spiegels kann durch diese Anordnung verzichtet werden. Die Präzisionswaage wird zur thermischen Regulierung komplett in ein Temperiergehäuse verpackt. Der Teststand verfügt über eine Schleusenkammer. Die Folienprobe kann über die Schleuse in den Rezipienten eingeführt werden, ohne dass der Rezipient belüftet werden muss. Die Waage steht somit ständig im Vakuum. Ferner besteht die Möglichkeit, eine Transferkammer an den Rezipienten anzuflanschen. Über diese Transferkammer könnten zuvor degradierte Proben aus der KOBE Anlage entnommen werden und, ohne sie der Atmosphäre auszusetzen, in den Strahlungsdrucktestand zur weiteren Vermessung eingeführt werden. Wird die Probe nach dem Bestrahlungsvorgang im Vakuum der Atmosphäre ausgesetzt, bestünde die Gefahr, dass atmosphärische Einflüsse wie Oxidations- oder Kondensationsprozesse die Ergebnisse der Bestrahlung im Vakuum verfälschen. Durch die Kombination der beiden Messeinrichtungen wären einzigartige in situ Untersuchungen des Degradationsverhaltes reflektierender Folien möglich.

Zuletzt bleibt die Frage offen, ob die Waage in Zukunft auch für andere Anwendungsfelder verwendet werden kann. Die modular zusammengestellte Messeinrichtung wurde speziell für die Vermessung des Strahlungsdrucks entwickelt. Eine bereits angedeutete neue Anwendung könnte die Vermessung von speziell beschichteten Folien sein. Solche Folien können durch desorbierende Molekülschichten einen zusätzlichen Impuls als Antrieb nutzen. Die Strahlungs-druckmessung ist für die Bestimmung der wirkenden Kräfte und sonstiger einhergehender Effekte bestens geeignet.
Die Möglichkeit, sehr geringe Kräfte unter Vakuumbedingungen messen zu können, lässt jedoch noch weitere Einsatzbereiche zu. Ein denkbares Anwendungsgebiet sind Mikroantriebe für die Raumfahrt. Bei der Lageregelung von Satelliten werden kleine Steuertriebwerke genutzt, die kurzzeitig Kräfte im Bereich von Mikronewton aussenden. Die Messeinrichtung könnte in Zukunft den Schub solcher kleinen Steuerdüsen unter Weltraumbedingungen vermessen.

Literaturverzeichnis

[1] A. Ashkin. *Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime.* Biophysical Journal, Vol. 61, 1992

[2] B. Dachwald et al. *Potential Effects of Optical Solar Sail Degradation on Trajectory Desig.* AAS/AIAA Astrodynamics Speciallists Conference, LakeTahoe, 2005

[3] J. Booless and C. McInnes. *Control of Lagrange point orbits using solar sail propulsion.* Acta Astronautica, Vol. 62 Issues 2-3, 2008

[4] R. Kezerashvili. *Solar Sail: Materials and Space Environmental Effects,* Advances in Solar Sailing, M. Mcadonald (Ed.), pp. 573-592, 2014 (ISBN: 978-3-642-34906-5)

[5] H. Spencer. *Real Solar Sails Are Not Ideal, And Yes It Matters.* Advances in Solar Sailing, M. Mcadonald (Ed.), pp. 921-940, 2014 (ISBN: 978-3-642-34906-5)

[6] B. Dachwald and W. Seboldt, *Solar Sail for near-term advanced scientific deep space missions, Rocket Propulsion: Present and Future.* (Edited Proceedings of the 8th International Workshop on Combustion and Propulsion, Pozzuoli, Italy, 16 - 21 June 2002), Paper 49, Politechnico di Milano, Milano, 2003

[7] A.B. Artusio-Glimpse and G.A. Swartzlander, Jr. *Thrust Efficiency on an Idealized Deformable Sai.,* Advances in Solar Sailing, M. Mcadonald (Ed.), pp. 457-468, 2014 (ISBN: 978-3-642-34906-5)

[8] B. Dachwald, and G. Mengali and M. MacDonald. *Parametric Model and Optimal Control of Solar Sails with Optical Degradation*. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 29, No.5, 2006

[9] M. Sznajder and U. Geppert. *H_2 Blister Formation on Metallic Surfaces: A Candidate for Degradation Processes in Space.* Advances in Solar Sailing, M. Mcadonald *(Ed.)*, pp. 559-572, 2014 (ISBN: 978-3-642-34906-5)

[10] J. Kepler. *De Cometis libelli tres.* 1619

[11] J. Cannon and S. Dostrovsky. *Newton (1678)*. The Evolution of Dynamics: Vibration Theory from 1687 to 1742, Springer Verlag, 2017

[12] C. McInnes. *Solar Sailing Technology, Dynamics and Mission Application*s. 1999 (ISBN: 978-1-852-33102-3)

[13] A.H. Besck. *Gases and Vacua: Handbook of Vacuum Physics*. Pergamon Verlag, 1964 (ISBN: 978-0080104256)

[14] W.H. Brock. *W. Crookes (1832-1919) and the Commercialization of Science*. Routledge, 2008 (ISBN: 978-0754663225)

[15] P.N. Lebedev. *Experimental Examination of Light Pressure*. Ann. der Physik 6, 433, 1901

[16] E.L. Nichols. *Biographical Memoir of Ernest Fox Nichols 1869 – 1924.* National Academy of Sciences, 1925

[17] W. Gerlach and A. Golsen. *Untersuchungen an Radiometern. II. Eine neue Messung des Strahlungsdruckes.* Zeitschrift für Physik Bd XV, 1923

[18] P.A. Gray and D.L. Edwards and M.R. Carruth, Jr. *Preliminary Photon Pressure Measurements using a Solar Simulator*. AIAA Conference, Reno Nevada, 2001

[19] N. Melnik. *Aufbau und Test einer Messeinrichtung zur Untersuchung des Lichtdrucks auf dünne, reflektierende Folien unter Weltraumbedingungen*. Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, 2003

[20] C. Jenkins et al. *Gossamer Spacecraft: Membrane and Inflatable Structures Technology for Space Applications*. Progess in Astronautics and Aeronautics, Vol. 191, 2001

[21] C. Wiley. *Clipper Ships of Space*. Astounding Science Fiction, p. 135, 1951

[22] R.L. Garwin. *Solar Sailing: A Practical Method of Propulsion within the Solar System*. Jet Propulsion, Vol. 28, No. 123 pp. 188-190, 1958

[23] J.A. Dunne and E. Burgess. *The voyage of Mariner 10: Missions to Venus and Mercury*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1978 (NASA-SP-424)

[24] J. Benford and G. Benford. *Near-Term Beamed Sail Propulsion Missions:Cosmos-1 and Sun-Diver*. Wayback Mashine, 2007

[25] E. Montgomery and L. Johnson. *The Development of Solar Sail Propulsion for NASA Science Missions to the Inner Solar System*. NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, 2004

[26] O. Mori et al. *Dynamic and Static Deployment Motions of Spin Type Solar Sail*. ISAS/JAXA, 2004

[27] D. Coulter. *A Brief History of Solar Sails*. NASA, 2008

[28] O. Mori et al. *Overview of IKAROS Solar Sail Missio.* Advances in Solar Sailing, M. Mcadonald (Ed.), pp. 25-44, 2014 (ISBN: 978-3-642-34906-5)

[29] D.C. Alhorn, et al. *NanoSail-D: The Small Satellite That Could!* Proceedings of the 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, UT, USA, 2011

[30] N. N. *A contour plot of the effective potential of a two-body system. (the Sun and Earth here), showing the 5 Lagrange points*. NASA, Internetadresse: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lagrange_points2.svg, 2018

[31] J.C. Maxwell. *Electricity and Magnetism*. Oxford University Press, 1873

[32] J.L. Wright and J.M. Warmke. *Solar Sail Mission Applications*. AIAA-76-808, AIAA/ASS Astrodynamics Conference, San Diego, 1976

[33] D. Meschede. *Gerthsen Physik*. 21. Auflage, Springer Verlag, p.481, 2001

[34] B. Patzer. *Einführung in die Astronomie und Astrophysik*. FU Berlin, 2010

[35] G. Pagel. *Extremale Steuerstrategien für Sonnensegler am Beispiel von Bahntransferproblemen zum Mond*. TU Berlin, pp. 12, 23; 2002

[36] P.N. Lebedev. *The Pysical Causes of Deviation from Newton's Law of Gravitation.*. Astrophysical Journal, 10, pp. 155-161, 1902

[37] V. Lembessis. *P.N. Lebedev and light radiation pressure*. Europhysics News Vol. 31 No. 7, 2001

[38] E.F. Nichols and G.F. Hull. *The Experimental Investigation of the Pressure of light*. Astrophysical Journal, 15, pp. 60-65, 1902

[39] E.F. Nichols and G.F. Hull. *The Pressure due to Radiation.* Physical Review, 17, pp. 26-50, 1903

[40] N.N. *Study Overview of a Solar Sail Demonstrator: GEOSAIL*. ESA, SCI-PA/2007/018/Geosail, 2008

[41] U. Geppert and B. Biering and F. Lura and R. Reinhard. *The 3-Step DLR-ESA Gossamer Raod to Solar Sailing.* 2nd International Symposium on Solar Sailing, pp. 35-40, New York, 2010

[42] N.N. *Titel: Vakuumtechnik; Benennung und Definitionen; Allgemeine Benennungen* . DIN 28400-1, Ausgabe 1990-05

[43] N.N.. *The Vacuum Technology Book, Volume II*. Band 2, Pfeiffer Vaccum GmbH, 2013

[44] L. Bretschneider. *Modifizierung einer industriellen Wärmebildkamera zum Einsatz unter Weltraumbedingungen*. FHTW Berlin, p. 10, 2000

[45] Z. Kleinman and G. Goloviznin. *Measurement of the light pressure and energy of laser pulse*. Soviet Physics Journal Vol.12, Issue 6, pp. 726-730, 1969

[46] J.F. O'Hanlon. *A User's Guide to Vaccum Technology*. Wiley-Interscience, 3. edition, 2003

[47] M. Wutz and K. Jousten. *Handbuch der Vakuumtechnik –Theorie und Praxis. 8.* Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2004

[48] J.T. Grundmann and P. Spietz and P. Seefeldt and T. Spröwitz. *Gossamer Deployment Systems for Flexible Photovoltaics.* Proceedings of the 67th International Astronautical Congress. 67th Internationa Astronautical Congress (IAC), 26-30 Sep 2016, Guadalajara, Mexico., 2016

[49] H. Paul. *Photonen -Eine Einführung in die Quantenoptik*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1995

[50] Y. Shirasawa et al. *Evaluation of Sail Mechanics of IKAROS on its Slow-Spin and Reverse-Spin Operation.* Advances in Solar Sailing, pp. 57-74, 2014

[51] C. Biddy and T. Svitek. *LightSail-1 Solar Sail Design and Qualifikation*. Proceedings of the 41st Aerospace Mechanisms Symposium, Jet Propulsion Laboratory, May 16 -18, 2012

[53] N. Melnik and U. Geppert and B. Biering and F. Lura. *Light pressure measurement at DLR Bremen.* Advances in Solar Sailing, pp. 399-406, 2014

[54] N. N. *Betriebsanleitung Satorius ME und SE*. Sartorius AG, Göttingen, 2007

[55] J. Rößler. *Qualitätsmanagementhandbuch RY*. DLR, 2017

[56] G. Benford and J. Benford. *Acceleration of sails by thermal desorption of coatings.* Acta Astronautica 56, pp. 593-596, 2005

[57] G. Franchetti. *Vacuum I*. GSI Darmstadt, 2013

[58] M. Sznaider and U. Geppert. *H2 blister formation on metallic surfaces –a degradation process in space.* Advances in Solar Sailing, pp. 559-572, 2014

[59] M. Koßagk. *Konstruktion und Entwicklung eines Lichtdruckmessstandes (LIMES).* Technische Universität Dresden, 2011

Anhang

Modifizierung der Waage

Die Präzisionswaage ist ein sensibles Labormessgerät. Sie ermittelt die Ruhelage ihres Systems über einen optischen Lagesensor, siehe Abbildung 7.1. Die Nulllage des Übersetzungshebels wird von zwei Photozellen erfasst. Der Hebel hat an seinem Ende einen Schlitz. Auf der einen Seite dieses Schlitzes ist eine Diode montiert, welche Licht aussendet. Auf der anderen Seite sind die zwei Photozellen montiert. Sie erfassen das Licht der Diode, welches durch den Schlitz fällt. Dieser sensible Sensor ist in der Lage die Nulllage des Übersetzungshebels auf einige Nanometer genau zu bestimmen. Für die spezielle Anwendung im Hochvakuum bei intensiver Bestrahlung ist die Waage nicht konzipiert. Die Anforderungen an die Waage und damit einhergehende mögliche Störeinflüsse gilt es zu analysieren.

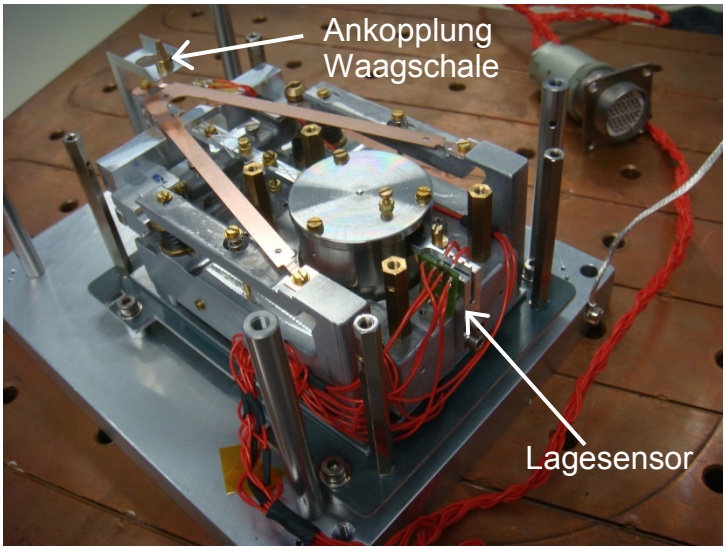

Abbildung 7.1: Blick ins Innere der Waage

Abbildung 7.2 zeigt schematisch den Prozess der Konfektionierung der Waage. Zunächst wird die Waage auf das Verhalten im Hochvakuum untersucht. Wie im dritten Kapitel bereits beschrieben, reagiert die Waage auf den fehlenden Luftdruck im Vakuum mit einem Offset. Dieser Achsversatz beeinträchtigt die Wägefunktion nicht. Beim Evakuieren und Belüften der Vakuumkammer zeigt die Waage eine reproduzierbare Reaktion. Die Waage stabilisiert sich bei konstantem Druck, so dass eine Wägung im Hochvakuum möglich ist. Die Messfunktion der Waage ist durch eine erfolgreiche Wägung von Siliziumkügelchen im Hochvakuum nachgewiesen. Kleine Druckänderungen in der Größenordnung von 10^{-6} mbar üben keine Wirkung auf die Wägefunktion aus. Für eine Messung des Strahlungsdrucks muss der Enddruck entsprechend niedrig sein. In der Messeinrichtung wird ein Umgebungsdruck $\leq 5*10^{-7}$ mbar durch das Zuschalten des Kältehintergrunds erreicht.

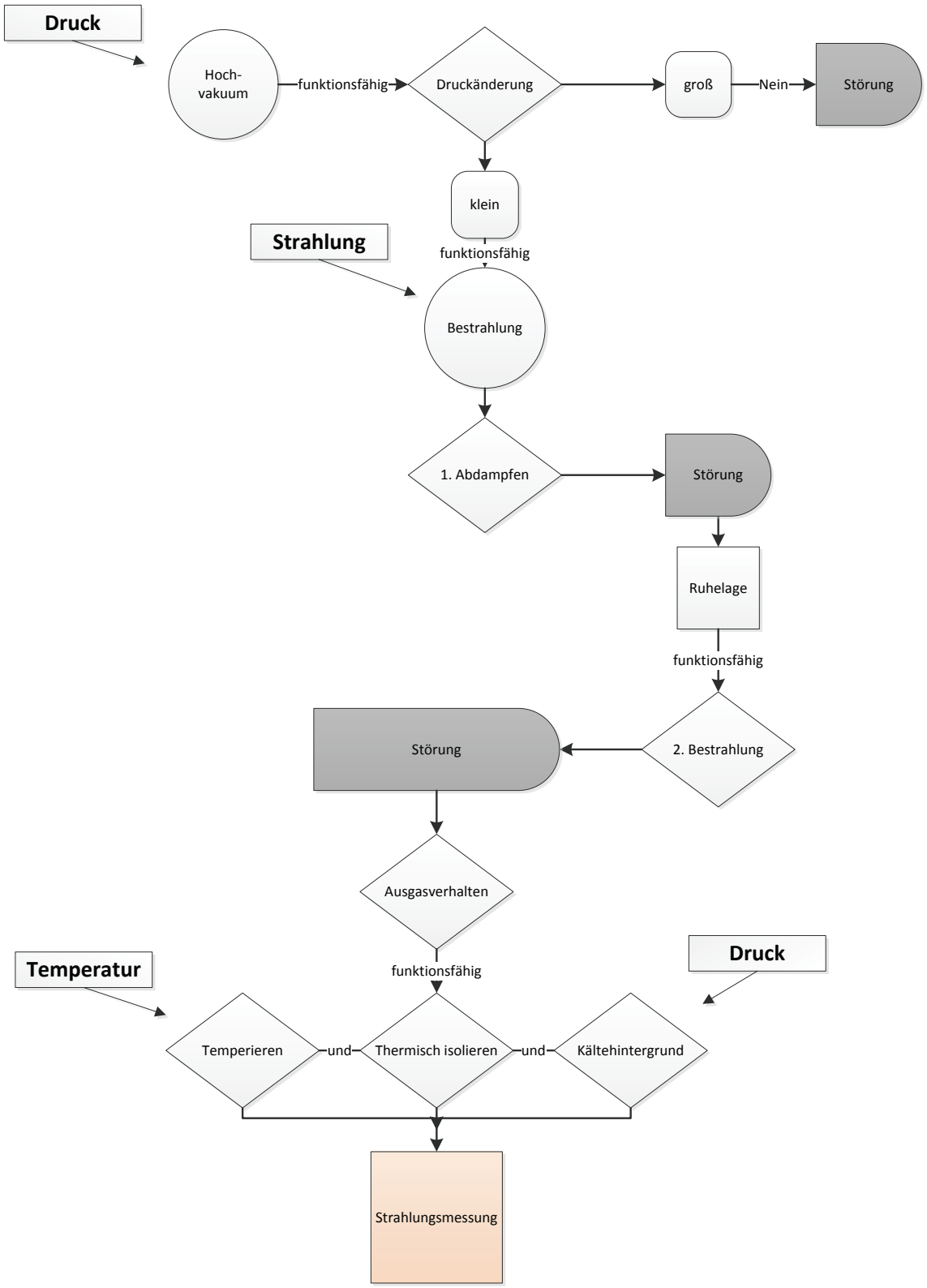

Abbildung 7.2: Prozessverlauf der Waagen-Konfektionierung

Die Strahlungseinwirkung im Vakuum auf die Waage hat verschiedene Auswirkungen. Bei der ersten Bestrahlung der Segelfolie im Vakuum desorbiert die Molekülschicht auf der Folie. Dieser Effekt lässt den Druck im Rezipienten zunächst leicht ansteigen. Der Druckanstieg liegt in einem Bereich von $0{,}5*10^{-6}$ mbar. Die Wägefunktion der Waage ist durch diese geringe Druckänderung nicht beeinträchtigt. Das Lösen der Molekülschicht passiert plötzlich und bringt die hoch sensible Waage aus dem Gleichgewicht. Eine Quantifizierung des Strahlungsdrucks ist bei der ersten Bestrahlung nicht möglich. Für ein Standardmessverfahren muss dieser Effekt berücksichtigt werden.

Die Strahlung übt auf die Waage auch eine thermische Reaktion aus. Zum einen erwärmt sich der gesamte Rezipient, dadurch erhöht sich auch die Temperatur der Waage. Die Waage wird mit einer Temperierplatte und einer MLI-Haube bestückt, um die Waage auf einer konstanten Temperatur zu halten. Zum anderen entsteht ein Temperaturgradient innerhalb der Waage, aufgrund von Wärmeleitung über die Waagschale und den Schalenzapfen. Dieser Temperaturgradient führt zu einem Störeffekt. Die Wärmeleitung wird durch eine Glasisolierung unterbunden. Der thermische Störeffekt ist durch die Modifizierung zu vernachlässigen.

Standardarbeitsanweisung: QMH-RY-MTS-06-A05_v1-1-Strahlungsmessung

QMH RY - OE Mechanik und Thermalsysteme

Arbeitsanweisung

Strahlungsmessung

DOKUMENT NR.:	QMH–RY–MTS–06–A05
AUSGABE:	1.1
DATUM:	11.01.2018

ERSTELLT: 11.01.2018 N. Melnik
DATUM, N. MELNIK

GEPRÜFT UND FREIGEGEBEN: 23.01.2018 E. Mikulz
DATUM, E. MIKULZ, LABORLEITER

DLR

Inhaltsverzeichnis

1 ZWECK 3

2 GELTUNGSBEREICH 3

3 BESCHREIBUNG DER GRUNDSÄTZLICHEN ARBEITSABLÄUFE FÜR DIE STRAHLUNGSDRUCKMESSUNG IN DER SSA 3

3.1 GRUNDREGELN 3
3.1.1 Verhalten im Reinraum 3
3.1.2 Grundsätzliche Logbuch Einträge 4
3.1.2.1 Vor dem Versuch 4
3.1.2.2 Während des Versuches 4
3.1.2.3 Nach dem Versuch 4
3.2 TESTAUFBAU 5
3.2.1 Mögliche Testvarianten 5
3.2.2 Persönliche Schutzausrüstung 6
3.2.3 Einfluss der Luftfeuchte 6
3.3 TESTVORBEREITUNG 6
3.4 TESTEINBAU INKL. JUSTAGE 6
3.5 INBETRIEBNAHME DES SOLARSIMULATORS 7
3.6 TESTABLAUF (PROZEDUR) DER STRAHLUNGSDRUCKMESSUNG 7
3.7 AUSSCHALTEN DES SOLARSIMULATORS 8
3.8 TESTABBAU 8
3.9 TESTNACHBEREITUNG 8

4 AUSWERTUNG STRAHLUNGSDRUCKMESSUNG 9

4.1 DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE 9
4.2 AUSWERTUNG 9
4.3 MINDESTANGABEN IM TESTBERICHT 10

5 MITGELTENDE UNTERLAGEN 11

6 ÄNDERUNGSDIENST 11

7 ANHANG 1: CHECKLISTE SSA- TEST 12

8 ANHANG: TESTEQUIPMENT 13

1 Zweck

Diese Arbeitsanweisung beschreibt das grundsätzliche Vorgehen der Messung des Strahlungsdrucks in der Sonnen-Simulations-Anlage (SSA) mittels der Photonenwaage (modifizierte Präzisionswaage der Firma Sartorius). Das Ziel ist eine reproduzierbare Vermessung des Strahlungsdrucks auf Folienproben.

2 Geltungsbereich

Diese Arbeitsanweisung gilt innerhalb der Abteilung Mechanik- und Thermalsysteme am Institut für Raumfahrtsysteme.

3 Beschreibung der grundsätzlichen Arbeitsabläufe für die Strahlungsdruckmessung in der SSA

3.1 Grundregeln

Grundlage der Strahlungsdruckmessung ist die Kenntnis der Bedienung der Vakuumanlage inklusive des Solarsimulators der SSA, sowie des Thermostaten (Huber), der verwendeten Messtechnik inklusive der Photonenwaage und der physikalischen Grundlagen der Temperatur- und Gewichtsmessung.

Damit die Testanlage jederzeit arbeitsfähig ist, sind Änderungen, Ein- oder Umbauten an und in der Testanlage oder ihrem Zubehör nur in Absprache mit dem Laborleiter zulässig. Insbesondere sind für Vakuumanlagen Lecks an Verbindungen/ Rohrleitungen für Temperierflüssigkeiten sehr kritisch. Die Kontrolle der Dichtheit solcher Systeme ist deshalb besonders wichtig. Der Laborleiter trägt die Verantwortung für den sachgemäßen Umgang mit seiner Testanlage und dem Zubehör, weshalb auch unbefugtes Eingreifen oder gar Entfernen von Zubehör untersagt sind.

Es gilt:

1. Der Laborleiter verwaltet seine Grundausstattung und sämtliches Zubehör (Kabel, Fühler...).
2. Weitergehender spezieller Bedarf wird über den Laborleiter angefordert.
3. Die Messfähigkeit gefährdende Störungen sind unverzüglich dem Laborleiter bekannt zu geben und mit höchster Dringlichkeit zu beseitigen. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob eine Störmeldung geschrieben werden muss.
4. Experimentelle Untersuchungen ohne Testauftrag sind unmittelbar mit dem Laborleiter abzuklären.
5. Prinzipiell sind alle Tests sinngemäß der entsprechenden Anweisungen auszuführen.
6. Über die Inbetriebnahme/Bedienung der Testanlagen darf nur der Laborleiter entscheiden. Bedienpersonal ist gegebenenfalls vom Laborleiter nach Einweisung/Belehrung zu autorisieren.

3.1.1 Verhalten im Reinraum

Das SSA-Labor ist ein Reinraum der ISO Klasse 8. Folgende Verhaltensregeln sind zu befolgen:

- Essen und Trinken sind in den Laborräumen, einschließlich Vorräume, nicht erlaubt.

- Das Rauchen ist nicht erlaubt.
- Raucher müssen nach einer gerauchten Zigarette mind. 30 Minuten warten und Hände waschen, bis sie die Schleuse wieder betreten dürfen.
- Auf die Wirksamkeit der Schleusenfunktion im Zugangsbereich zu den Reinräumen ist zu achten!
- Die Räume sind nur mit zugelassener Reinraumschutzkleidung zu betreten. Die Ankleidevorschrift in der Schleuse ist zu befolgen.
- Bartträger (länger als 3-Tage-Bart) müssen zusätzlich einen Bartschutz tragen.
- Die persönliche Reinraumkleidung ist nach Benutzung wieder in der dafür vorgesehenen Garderobe im Vorraum aufzubewahren und bei Verschmutzung dem Sammelbehälter zur Reinigung zuzuführen.
- Wenn sich in den Reinraumlaboren kontaminationskritische Geräte bzw. Prüflinge befinden, darf dessen Handhabung nur mit Schutzhandschuhen erfolgen.
- Prüfgeräte, Testanlagen und Prüflinge, die in einen Reinraum gebracht werden sind vorher auf Sauberkeit zu überprüfen und im Zweifelsfalle zu reinigen.
- Der Transportwagen in der Schleuse sowie alle in der Schleuse und Reinräumen befindlichen Gegenstände und Hilfsmittel sind nur für den Einsatz im Reinraum vorgesehen und sind nach Benutzung außerhalb entsprechend zu reinigen und zurückzustellen.

3.1.2 Grundsätzliche Logbuch Einträge

Alle Handlungen mit dem Testobjekt sind in das Laborbuch einzutragen, einschließlich der Testvorbereitung, -durchführung und -nachbereitung.

3.1.2.1 Vor dem Versuch

- Datum/Uhrzeit. **Wichtig**: Vor jedem Versuchsstart sind die Zeiten von MWE und PC zu synchronisieren.
- Luftfeuchtigkeit der Laborluft
- Versuchsskizze mit Messfühlern, wenn möglich mit Fotos
- Messwertdateien

3.1.2.2 Während des Versuches

- Leistung des Solarsimulators
- Verbrauch der KKW

3.1.2.3 Nach dem Versuch

- Endtemperatur vor dem Belüften
- Unterschrift des Protokollanten
- Testergebnis laut Prüfvorschrift

3.2 Testaufbau

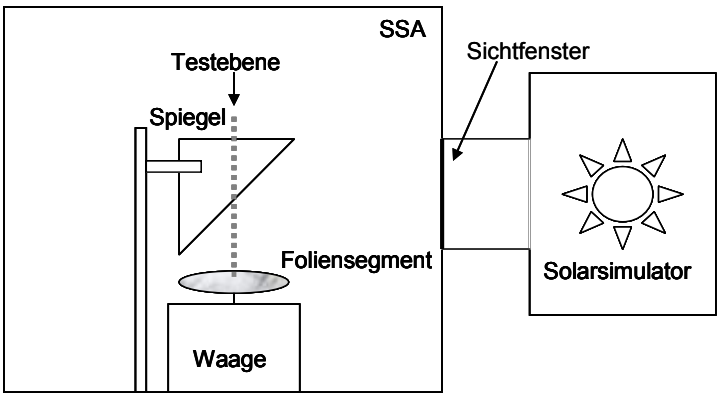

Abbildung 1: Skizze des Testaufbaus

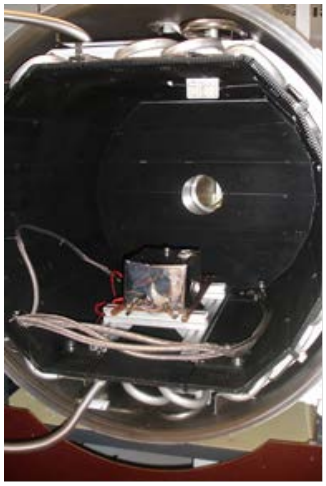

Abbildung 2: Testaufbau ohne Spiegel

Die Präzisionswaage (Abbildung 3) wird auf einer Temperierplatte in der Testebene positioniert und mit einer M8 Schraube an der Temperierplatte befestigt. Die Spiegelhalterung (Abbildung 4) wird ebenfalls auf der Temperierplatte positioniert. Die Vorgehensweise der Justage ist Kapitel 3.4 zu entnehmen. Nachdem der Strahlengang des Solarsimulators auf die Waagschale ausgerichtet ist, kann die Folienprobe auf die Waagschale abgelegt werden.

Abbildung 3: Wägezelle der Präzisionswaage

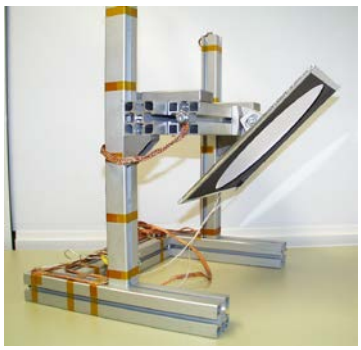

Abbildung 4: Spiegel mit Halterung

3.2.1 Mögliche Testvarianten

In dieser Testprozedur sind zwei verschiedene Testvarianten (Kapitel 3.5) beschrieben. Die Varianten unterscheiden sich durch den Umgebungsdruck. In der ersten Variante wird die Kaltwand mit flüssigen Stickstoff gekühlt um den Enddruck der Kammer $\leq 5*10^{-7}$ bar zu erreichen. Diese aufwendige Testdurchführung wird durch die zweite Variante ergänzt. Dabei kann auf die kryogene Kühlung der Kaltwand verzichtet werden. Ein Umgebungsdruck von $1*10^{-6}$ bar wird somit nach etwa 24 Stunden erreicht. Diese Variante ist allerdings durch die Desorption der Restgasmoleküle mit einem Fehler behaftet, welches in der Nachbereitung (Kapitel 3.9) bei der Auswertung zu berücksichtigen ist.

3.2.2 Persönliche Schutzausrüstung

Beim Justieren der Messeinrichtung muss eine persönliche Schutzausrüstung (PSA) getragen werden. Dafür stehen im SSA-Labor spezielle Sonnenbrillen und Sonnencreme bereit. Des Weiteren sind Handschuhe und (Reinraum-) Kittel beim Testaufbau zu tragen.

3.2.3 Einfluss der Luftfeuchte

Die rel. Luftfeuchtigkeit ist mit dem Handhygrometer im Labor zu messen. Wenn die rel. Feuchte der Laborluft größer als 60% ist, darf die Probe nicht aus dem Transportcontainer entnommen werden. Die Luft der Labore muss erst mit Hilfe der Trocknungsmaschinen entfeuchtet werden.

3.3 Testvorbereitung

- Prüfen der gültigen Kalibrierung der zu verwendenden Messtechnik
- Anbringen der Temperaturfühler an der Temperierplatte
- Anbringen aller Mess-, Steuer- und Stromversorgungskabel und Verbinden mit der SSA.
- Einschalten aller Stromversorgungen, Mess- und Steuerrechner. Durchführung eines Systemchecks aller elektrischen Verbindungen.
- Überprüfung aller Flüssigkeitsdurchführungen auf festen Sitz

3.4 Testeinbau inkl. Justage

- Waage auf der Temperierplatte ausrichten und befestigen (mit M8 Schraube)
- PSA anziehen
- Solarsimulator einschalten (mit Blende)
- Spiegelhalterung installieren
- Spiegel und Waage zueinander in der Arbeitsebene ausrichten, so dass die Folienprobe komplett und zentriert bestrahlt wird
- Solarsimulator abblenden
- Waage nivellieren
- MLI Haube auf die Waage aufsetzten (siehe Abbildung 11 im Anhang)
- Waage an die Stromversorgung anschließen (Achtung: mind. 12h akklimatisieren)
- Bestrahlungsstärke am Solarsimulator einstellen und mit dem mobilen Handstrahlungsmesser E5000 vermessen (Achtung: exakte Vermessung erfolgt nach der Strahlungsdruckmessung)
- Erdungslitzen der Spiegelhalterung an dem Testwagen befestigen (Widerstand <100Ω) (siehe Abbildung 12 im Anhang)
- Waage kalibrieren: dazu mit provisorischen Windschutz (Becherglas), den Kalibrierwaagschalen und dem Kalibriergewicht die Kalibrierung starten (siehe Abbildung 13 im Anhang)
- Folienprobe auf Waagschale ablegen
- Flüssigkeitsdurchführungen des Thermostaten (Huber) verbinden
- Elektrische Verbindungen herstellen und überprüfen
- verschließen der Anlagentür.

Achtung, keine Kabel einklemmen!

3.5 Inbetriebnahme des Solarsimulators

1. Grünen Schalter am Stromversorgungsgerät einschalten -> Lüfter im Gerät läuft
2. Blauen Schalter am Stromversorgungsgerät einschalten -> Lüfter im Lampenhaus läuft
3. Wenn der Lüfter im Lampenhaus mit Nenndrehzahl läuft: Schwarzen Schalter am Stromversorgungsgerät einschalten -> Lampe zündet. Wenn Lampe in 10 s nicht gezündet hat, mit rotem Schalter ausschalten und erneut den schwarzen Schalter betätigen, bis die Lampe startet.
4. Für die Dauer der Messreihe bleibt der Solarsimulator eingeschaltet. Die Strahlung wird über eine Blende im Strahlengang abgeblendet, um eine konstante Bestrahlung zu gewährleisten.

Die Einstellung der Intensität erfolgt über das Steuergerät. Das Gerät verfügt über drei Anzeigen und zwei Kontrolllampen:

- Lichtmonitor: Anzeige der Strahlungsleistung in der Testebene in W/m²
- Reglerstrom und Lampenstrom: Anzeige der Lampenkennwerte
- Regler: Statusanzeige Regler an/aus
- Begrenzer: Der Begrenzer sorgt dafür, dass beim Starten die Lampenspannung nicht unkontrolliert hochgefahren wird, um den eingestellten Sollwert der Strahlungsleistung zu erreichen.

Bei Ausfall einer Lampe: Laborleiter informieren!

3.6 Testablauf (Prozedur) der Strahlungsdruckmessung

- SSA durch betätigen des grünen Tasters „*LUV 25.1*“ im 19´´ Schrank einschalten
- Hauptschütz für die Vakuumpumpen durch betätigen des grünen Tasters „Pumpe“ im 19´´ Schrank einschalten
- Hauptschalter der Pumpstandssteuerung einschalten
- Schlüsselschalter „*Auto / Hand*“ auf Automatik schalten
- Evakuieren der SSA (Pumpen einschalten): Taster „*Automatik EIN*“ betätigen; der weitere Ablauf erfolgt automatisch
- Inbetriebnahme der MWE, Yokogawa (Details siehe Betriebshandbuch SSA QMH-RY-MTS-06-A24)
- Einschalten der Waage, Start Messwerterfassung (Achtung: erst ab 10^{-4} mbar wegen Glimmentladung)
- Einschalten der Temperierung (HUBER) auf 20°C (Achtung: erst ab 10^{-4} mbar zur Ermittlung eines möglichen Lecks)
- Rezipient ausheizen (Details siehe Betriebshandbuch SSA QMH-RY-MTS-06-A24)
    - KKW auf 100°C heizen, solange bis der Druck wieder fällt

Variante 1	Variante 2
KKW mit lN_2 auf <150°C kühlen (Details siehe Betriebshandbuch SSA QMH-RY-MTS-06-A24)	-x-
Abwarten der entsprechenden Temperaturgleichgewichte und Stabilisierung des Umgebungsdruckes auf $p < 5*10^{-7}$mbar	
Abwarten bis die Waage eine Drift ≤0,0010mg/h (=Ruhelage) erreicht	
Erstes Abdampfen: 5min Bestrahlung	
Abwarten bis die Waage in die Ruhelage kommt (≤0,0010mg/h)	
Bestrahlungszyklus mehrfach wiederholen (durch ein- und ausblenden des Lichtstrahls):	
1min Bestrahlung + 1min Pause	
Die Bestrahlungsstärke kann bei Bedarf verändert werden und ein Bestrahlungszyklus wiederholt werden. (Achtung: bei intensiver Bestrahlung kann es durch die Wärmeleitung zu einer erhöhten Drift der Waage kommen. Tests sind nur möglich bei ≤0,0010mg/h)	
Ausschalten der KKW, einschalten der KKW-Heizung. Achtung: Erst wenn alle Temperaturfühler der KKW die Taupunkttemperatur des SSA- Labors erreicht haben, kann die SSA belüftet werden.	-x-

- Abspeichern der Messdaten unter eindeutigem Namen
- Vakuum Stop: Taster *„Automatik AUS"*
- Belüftungen: Taster *„Belüftung Rezipient"*

3.7 Ausschalten des Solarsimulators

1. Abschalten der Lampe über Taster *„Netz Aus"* am Lampentransformator.
2. Nach Abkühlung der Lampe (mindestens 20 Minuten warten) Taster *„Strahlung Aus"* im 19`` Schrank betätigen.

3.8 Testabbau

- Entfernen der Spiegelhalterung (Achtung: Erdungslitzen lösen)
- Entfernen der Folienprobe und der MLI
- Trennen aller elektrischen Verbindungen und Flüssigkeitsdurchführungen

3.9 Testnachbereitung

- Archivieren der Testdaten
    - Standardspeicherort (SSA Labor):
      G :\19_MTS\40_Testaufträge\40_Testaufträge[Jahr]\10_STV
- Messen der Bestrahlungsstärke in der Testebene mit einer speziellen Messvorrichtung (siehe Abbildung 7 und 8 im Anhang)
- Erstellen des Testberichtes/Messprotokoll

4 Auswertung Strahlungsdruckmessung

4.1 Darstellung der Ergebnisse

Die Abtastrate für die Masse liegt bei 1/10 Hz. Alle zehn Sekunden wird ein Messwert aufgenommen. Für die Ermittlung des Strahlungsdrucks, wird der Massenverlust Δm- herangezogen der Gewichtsverlust aufgrund des fehlenden Strahlungsdrucks nach dem Ausblenden des Lichtstrahls.

4.2 Auswertung

Folgende Messgrößen werden ermittelt:

- **Masseverlust Δm-** : Der Masseverlust infolge aussetzender Bestrahlung ist die eigentliche Messgröße. In den Testreihen können beliebig viele Bestrahlungszyklen wiederholt werden. (Achtung: Die Drift der Waage ist zu beachten, bei >0,0010 mg/h sind keine Messungen möglich.) Die Messwerte eines Zyklus werden gemittelt sowie der mittlere quadratische Fehler der Einzelmessung bestimmt.
- **Bestrahlungsstärke W**: Die gewünschte Bestrahlungsstärke wird an dem Solarsimulator eingestellt. Die Einstellung bezieht sich auf die Bestrahlungsstärke in der definierten Testebene der SSA. Die Intensität der Bestrahlung auf die Probenoberfläche in der effektiven Arbeitseben weicht von diesem Wert ab. Daher wird die Bestrahlungsstärke mit dem Solarstrahlungsmesser E 5000 in der Arbeitsebene vermessen.

  Diese Bestrahlungsstärkemessung erfolgt in zwei Schritten:

  - Vor der Strahlungsdruckmessung wird die Bestrahlungsstärke auf einen gewünschten Wert in der Arbeitsebene per Hand eingestellt.
  - Nach der Strahlungsdruckmessung wird die Bestrahlungsstärke in der Arbeitsebene über ein Raster von 200 einzelnen Punkten (je 1cm) vermessen. Von den gemessenen Werten wird der Mittelwert gebildet und der mittlere quadratische Fehler der Einzelmessung bestimmt.
- **Reflexionsgrad ρ**: Der Reflexionsgrad der Folien kann im UHV-Labor vermessen werden. Für die Aluminium beschichtete Kaptonfolie kann ein Wert von 0,91 ±0,02angenommen werden.
- **Umgebungsdruck p**: Der Umgebungsdruck wird mit der MWE Yokogawa aufgezeichnet (ebenso, wie die Temperaturen der PT100). Die Daten sind nur bei Unregelmäßigkeiten genauer zu betrachten. Leichter Druckanstieg (im Bereich von $5*10^{-6}$mbar) hat auf die Strahlungsdruckmessung keine störende Auswirkung.

Jede Messgröße wird in einer eigenen Datei erfasst. Die Rohdaten werden auf dem Abteilungsserver archiviert und zu einer Excel-Datei zusammengefasst. Der Dateiname dieses erstellten Dokuments wird wie folgt festgelegt: *DLR-STV-Strahlungsdruckmessung_"Titel"_jjjj_mm_tt*.

Weitere relevante Messgrößen sind:

- **Bestrahlte Fläche A**: Die Fläche der bestrahlten Folie (Ø160 mm) wird mit (0,0201±0,0005) m² angenommen.

- **Schwerebeschleunigung g**: 9,81 m/s²
- **Lichtgeschwindigkeit c**: 299.792.458 m/s²

Für die Auswertung der Ergebnisse wird der aus der Messung ermittelte Strahlungsdruck P_S mit dem zu erwartenden Strahlungsdruck P_{S_rech} verglichen.

Der zu erwartende Strahlungsdruck errechnet sich mit der Bestrahlungsstärke W und dem Reflexionsgrad ρ wie folgt

$$P_{S_rech} = \frac{W}{c}(1+\rho)$$

Der aus den Messwerten ermittelte Strahlungsdruck ergibt sich zu

$$P_S = \frac{F}{A} = \frac{\Delta m \cdot g}{A}$$

Durch die Messung der Massenänderung Δm- können nach folgender Formel die Verluste V_F bestimmt werden

$$(1+\rho-V_F) = \frac{\Delta m \cdot g \cdot c}{A \cdot W}$$

Wobei V_F aus folgenden Faktoren besteht

$$V_F = \rho_V(t,W) + V_{A\,real} + V_0,$$

mit $\rho_V(t,W)$ als die Degradation des Reflexionsgrads infolge der Bestrahlung über die Zeit, $V_{A\ real}$ beschreibt die Verluste durch die Unebenheit der Probenoberfläche und V_0 stellt weiteren unbekannte Verlusteffekte dar.

Variante 1

Messreihe	Bestrahlungs-stärke [W/m²]	mittlere Gewichtsdifferenz Δṁ [mg]	ermittelter Strahlungsdruck P_S [10^{-6}N/m²]	relativer Fehler	Berechneter Strahlungsdruck P_{srech} [10^{-6}N/m²]	Abweichung vom berechneten Strahlungsdruck
X1						X%
X2						Y%
X3						Z%

Variante 2

Abweichung vom berechneten Strahlungsdruck
(X+2,03)%
(Y+2,03)%
(Z+2,03)%

Wird der Strahlungsdruck nach der zweiten Variante vermessen, sind den Abweichungen von 2,03% zum berechneten Strahlungsdruck noch zu addieren.

4.3 Mindestangaben im Testbericht

Der Testbericht enthält immer mindestens folgende Angaben:

(1) Titel (Messreihe)

(2) Name des Testingenieurs

(3) Evtl. Kunden mit Namen und Anschrift

(4) Vertragsnummer oder Auftragsnummer, sofern vorhanden

(5) Testverfahren (Variante 1 oder 2)

(6) Kurze Beschreibung des Probe und der Testkonfiguration

(7) Ziel der Untersuchung

(8) Kurzfassung der Ergebnisse mit Datumsangaben des Tests

(9) Messergebnisse/Protokolle

(10) Auswertung

(11) Liste der eingesetzten Prüfmittel (Identnummer, Bezeichnung und Zuordnung im Testaufbau)

Die Punkte 3 und 4 beziehen sich auf eine Strahlungsdruckmessung als Auftrag durch externe Kunden. Für interne Messungen kann auf diese Angaben verzichtet werden.

5 Mitgeltende Unterlagen

- QMH-RY-MTS-06-A24, Betriebshandbuch SSA
- QMH-RY-MTS-05-A02, Zutrittsregelungen
- QMH-RY-MTS-06-A06, Sonnensimulationsanlage
- QMH-RY-MTS-07-V01, Erstellung und Freigabe von Prüfberichten (Testreports)
- Betriebsanleitung Satorius ME und SE

6 Änderungsdienst

Für die Weiterentwicklung und Pflege dieser AA ist der Laborleiter des STV-Labors zuständig.

Ausgabe	**Datum**	**Betroffene Seiten / Kapitel**	**Beschreibung der Änderung**
1.1	11.01.2018	alle	Initalversion

7 Anhang 1: Checkliste SSA- Test

Versuchsablaufcheckliste – durchzugehen für jeden Test

Kontrollen durch Testingenieur: Datum:	Checked
Funktionstest kurz (Pumpen, Solarsimulator, MWE, Thermostat)	
Kühlwasser im Kreislaufkühler checken	
Messaufbau und Probe in die SSA einbauen	
Schlauchverbindungen (HUBER) kontrollieren	
Temperaturfühler checken	
Messwerterfassung – Speicherintervall festlegen- Uhrzeit synchronisieren	
Kabelführung kontrolliert und SSA- Tür geschlossen!	
Funktionsbereitschaft Waage checken	
Ventile (HUBER) schließen	
Alle elektrischen Versorger ausgeschaltet: **Gefahr der Glimmentladung!**	
Vakuum starten	
Druck in der SSA ≤ $1*10^{-4}$ Torr erreicht, Ventil von HUBER öffnen und SSA Druck überprüfen	
Waage (bzw. elektrische Versorger) einschalten	
Protokollierung im Laborbuch	
Versuch gestartet	
Vor der Belüftung des Rezipienten, 1. Versuch beendet? 2. Alle Temperaturen oberhalb des Taupunktes? Waage (alle elektrischen Versorger) ausgeschaltet?	
3. Rezipient belüften	
Protokollierung im Laborbuch	
Versuch ohne Störungen beendet!	

8 Anhang: Testequipment

Abbildung 5: Sonnensimulationsanlage SSA

Volumen:	0,45 m^3
Druck:	$3*10^{-7}$ mbar
Kaltwandtemperatur:	~ -180°C bis +100°C
Kühlmittel:	flüssig Stickstoff

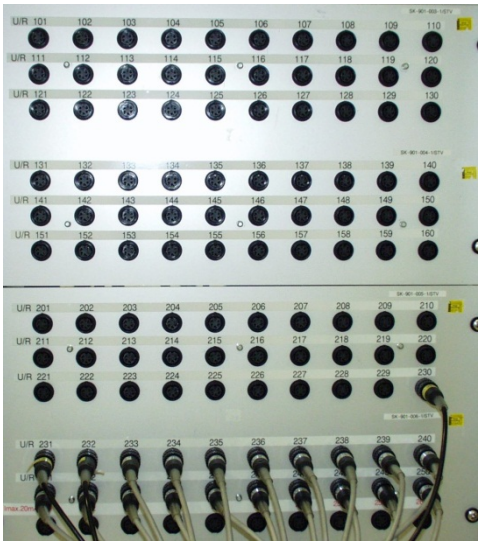

Abbildung 6: Messwerterfassung Yokogawa DC100 mit Anzeigedisplay

Tabelle 1: Datenblatt der Yokogawa DC100

Eingang	Typ	Messbereich (Digitalanzeige)		Max. Auflösung
		Messbereich	Messgenauigkeit	
Gleichspg.	20 mV	-20,000 bis 20,000 mV	± (0,05% + 5 digits)	1 µV
	60 mV	-60,00 bis 60,00 mV	± (0,05% + 2 digits)	10 µV
	200 mV	-200,00 bis 200,00 mV	± (0,05% + 2 digits)	10 µV
	2 V	-2000,0 bis 2000,0 mV	± (0,05% + 2 digits)	100 V µV
	6 V	-6,000 bis 6,000 V	± (0,05% + 2 digits)	1 mV
	20 V	-20,000 bis 20,000 V	± (0,05% + 2 digits)	1 mV
	50 V	-50,00 bis 50,00 V	± (0,05% + 2 digits)	10 mV
TC	E	-200,0 bis 800,0 °C	± (0,05% + 0,5 °C)	0,1 °K
RTD	Pt100(1mA)	-200,0 bis 500,0 °C	± (0,05% + 0,3 °C)	0,1 °C

Ausgedruckte Exemplare dieses Dokumentes unterliegen nicht dem Änderungsdienst!

Abbildung 7: Solarstrahlungsmesser E 5000

Lichtempfänger:	einkristalline Si-Solarzelle 20x20 mm
Einstrahlung:	0..5000W/m2
Zellentemperatur:	-10°C bis 100°C

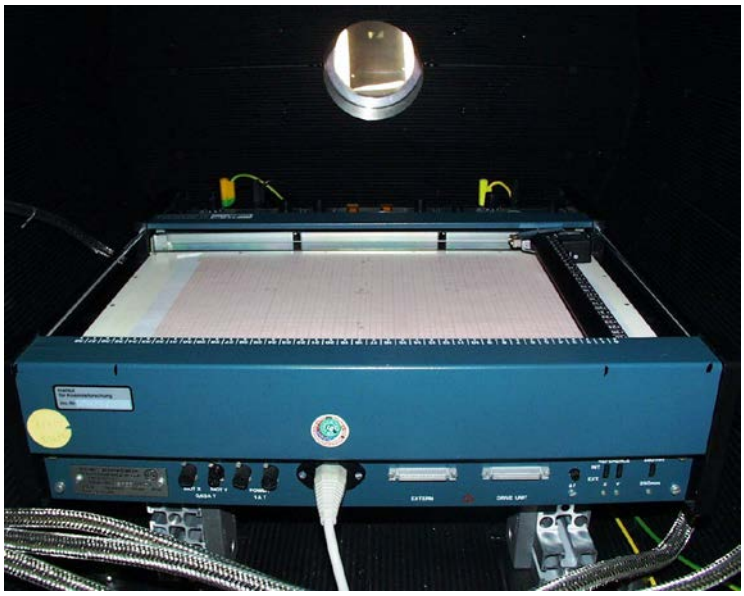

Abbildung 8: mm-Tisch zur Vermessung der Bestrahlungsstärke

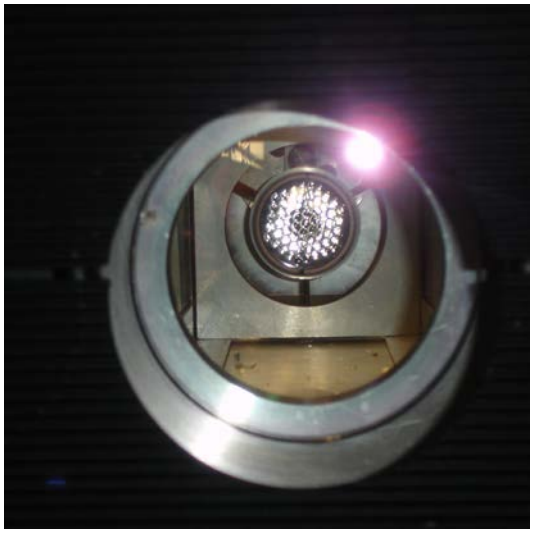

Abbildung 9: Solarsimulator

Sonnensimulation:	0,8...1,4 kW m^{-2}
Strahldurchmesser:	160 mm
Homogenität:	> 95 %
Spektrum:	0.2...2.5 µm, spektral korrigiert
Lampentyp:	Xenon Kurzbogenlampe (OSRAM XBO 1600 W/HS OFR)

Abbildung 10: Präzisionswaage

Wägebereich:	2,1 mg
Auflösung:	0,1 µg

Ausgedruckte Exemplare dieses Dokumentes unterliegen nicht dem Änderungsdienst!

Abbildung 11: MLI-Haube

Abbildung 12: Erdung des Messsystems

Abbildung 13: Kalibrierwaagschalen mit 2g-Kalibriergewicht

Abbildung 14: Thermostat Huber unistat 385