

Keine einfache Scheibe – zur (Schul-)Physik der Saturnringe

Oliver Schwarz

Die Bilder der Saturnringe faszinieren uns immer wieder aufs Neue. Wie schafft es die Natur bloß Eispartikel und Staub so prachtvoll zu arrangieren? Schon mit den Mitteln der Schulphysik können wir diesem Geheimnis auf die Spur kommen. Verschiedene Modellexperimente, Analogiebetrachtungen und kleinere Berechnungen helfen uns, die Entstehung planetarer Ringe zu erklären und einige Rätsel der Ringlücken und „Rillen“ zu lösen.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Mechanik Thermodynamik Optik	Teilchenstöße, Gravitationskraft, Trägheitskraft, Drehimpuls, Verteilungsfunktion, optisch Tiefe, Strahlenoptik
Astronomie	Planeten Kleinkörper	Entstehung der Ringstrukturen, Hirtenmonde, Materiescheiben
Verknüpfungen	Ma-Astro	Exponentialfunktion, Dreiecksberechnungen

Die detailreichen Strukturen des Saturnringes, seine Gliederung in Unterringe und die zahlreichen „Rillen“ und „Lücken“ erkennt man in einem Amateurfernrohr nicht. Von der Erde aus sind lediglich einige Helligkeitsabstufungen in den Ringen und sehr große Teilungen wie die Cassini-Teilung, eventuell die Encke-Teilung, zu sehen. Alle anderen Strukturelemente des Saturnringes wurden erst von den Raumsonden Pioneer 11, Voyager 1, Voyager 2 und Cassini aufgespürt.

Auch wenn schon lange Zeit vor der Raumfahrt bekannt war, dass es sich bei den Saturnringen nicht um eine massive Scheibe handeln kann – die Gravitationskräfte Saturns hätten diese Scheibe augenblicklich zerrissen – war man von den detailreichen Feinstrukturen überrascht, die auf den Fotos der Raumsonden zu sehen waren.

Nachfolgend wollen wir einige Fragen stellen, die für einen Betrachter der Ringpracht Saturns fast auf der Hand liegen und diese Fragen dann mit den Mitteln der Schulphysik beantworten.

Warum hat der Ring um Saturn eine innere Grenze? (Niveau Sek. II)

Deutlich sieht man in einem Fernrohr, dass der innere Rand „des“ Saturnringes nicht bis zur Planetenoberfläche hinunter reicht. Diese Beobachtung ist eigentlich überraschend, denn die Physik der Gravitation **allein** würde sehr wohl gestatten, dass sich Partikel auch in unmittelbarer Nähe zur Planetenoberfläche aufhalten. Sie müssten sich dann sehr schnell um Saturn herumdrehen und auf diese Weise der starken Gravitationskraft in der Nähe des Massenzentrums widerstehen. Die Existenz der inneren Ringgrenze weist uns darauf hin, dass es neben der **Gravitation** einen weiteren wichtigen Spieler in der Physik der Saturnringe gibt – den **Drehimpuls**.

Betrachten wir ein Ringteilchen der Masse m , das sich – aus welchen Gründen auch immer – näher an Saturn heranbewegt. Auf dieses Teilchen wirkt die Gravitationskraft

$$F_G = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \propto \frac{1}{r^2}. \quad (1)$$

Die Gravitationskraft ist – freilich keine aufregende Erkenntnis – indirekt proportional zum **Quadrat des Abstandes** Saturnmitte – Teilchen (r). Das Teilchen wird auf einer Kreisbahn um Saturn verbleiben, wenn die anziehende Gravitationskraft gerade durch die Zentrifugalkraft kompensiert wird. Für die Zentrifugalkraft einer Kreisbewegung gilt (ω : Winkelgeschwindigkeit des Teilchens):

$$F_z = m \cdot r \cdot \omega^2 \propto r \cdot \omega^2. \quad (2)$$

Sofern das Teilchen keinen Wechselwirkungen mit seiner Umgebung unterliegt und sich ausschließlich unter dem Gravitationseinfluss Saturns bewegt, muss es dem Drehimpulserhaltungssatz genügen. Der Drehimpuls L des Teilchens ist konstant. Für L können wir schreiben

$$L = m \cdot r^2 \cdot \omega \quad (3)$$

oder, wegen $L = \text{const}$,

$$\omega \propto \frac{1}{r^2}. \quad (4)$$

Aus (2) und (4) folgt für die Zentrifugalkraft.

$$F_z \propto r \cdot \omega^2 \propto r \cdot \frac{1}{r^4} \propto \frac{1}{r^3}. \quad (5)$$

Die überraschende Erkenntnis lautet: Für ein Teilchen, welches dem Drehimpulserhaltungssatz genügt, ist die Zentrifugalkraft indirekt proportional zur **dritten** Potenz des Abstandes zum Kraftzentrum.

Das bedeutet: Nähert sich ein Ringteilchen der Oberfläche Saturns an, dann **verkleinert** es seinen Abstand r und die Gravitationskraft wächst mit $1/r^2$ an. Die Zentrifugalkraft nimmt aber mit $1/r^3$ zu und wird deshalb in einem bestimmten Abstand zu Saturn die Oberhand über die Gravitation gewinnen. Das Teilchen kann dann nicht mehr weiter in Richtung Zentrum fallen – es sei denn, es wird seinen Drehimpuls irgendwie los. Für den Saturnring und ähnliche Gebilde gilt: Scheibenstrukturen im Universum besitzen einen „natürlichen“ inneren Rand.

Warum sind die Saturnringe so flach? (Niveau Sek. I+II)

Wegen seiner geringen Dicke kann man den Saturnring fast nicht erkennen, wenn man ihn von der "Kante" betrachtet. Da die Ringebene um 29° gegenüber der Saturnbahnebene geneigt ist, ändert sich die Ringstellung bezüglich der Erde allmählich. Gewährt der Ring gerade einen "Kantenblick", ist er von der Erde aus nicht zu sehen.

Der Saturnring ist im Mittel nur wenige 50-100 m dick - die Außenringe besitzen größere vertikale Abmessungen. Die radiale Ausdehnung des gesamten Ringsystems beträgt mehr als 400 000 km. Insgesamt sind die Teilringe Saturns also extrem flach.

Die Saturnringe bestehen aus unzähligen Partikeln, die sich gegenseitig stoßen und dabei aus der Scheibenebene herauskatapultieren können. Allerdings kreist jedes Ringteilchen zusätzlich zu diesem regellosen Bewegungsanteil um den Massenmittelpunkt Saturns. Auch ein aus der Ringebene herausgeschossenes Teilchen muss deshalb immer wieder zur Scheibenebene zurückkehren. Ein auf der Scheibe mitrotierender Beobachter würde von dieser Gesamtbewegung lediglich die senkrecht zur Scheibenebene orientierte Komponente wahrnehmen. Das Teilchen wird sich für ihn im Prinzip so verhalten, als hätte man es senkrecht nach „oben“ (oder „unten“) aus der Ringebene herausgeworfen.

Nachdem Lernenden diese Analogie verdeutlicht wurde, kann man einige Modellexperimente mit dem Schüttelapparat (Abb. 1) durchführen. Aus diesen Versuchen lassen sich Erkenntnisse gewinnen, die für das Verstehen der flachen Scheibenstruktur bedeutsam sind.

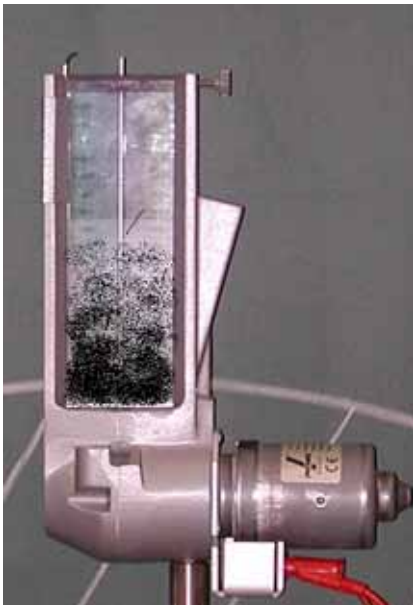


Abbildung 1: Ein Schüttelapparat verdeutlicht die Verhältnisse in der dünnen Planetenscheibe.

Wir füllen den Schüttelapparat erst mit sehr wenigen und dann mit sehr vielen Kugeln. Nach dem Einschalten des Gerätes ist zu sehen, dass bei sehr vielen Kugeln eine deutliche größere Konzentration der Teilchen zum Boden des Gerätes hin vorhanden ist. Diese als höher wahrgenommene Konzentration hat zunächst nichts mit der energetisch-statistischen Verteilung der Teilchen zu tun. Sie ergibt sich lediglich aus dem optischen Effekt, dass man *mehr* Teilchen auch *deutlicher erkennen* kann.

Füllen wir aber im Fortgang des Versuches noch einige vergleichsweise große Teilchen in das Gerät ein (z.B. Glasmurmeln), so nimmt die Konzentration am Boden des Schüttelapparates weiter zu. Die großen, schweren Teilchen können sich nämlich nicht sehr weit vom Boden entfernen und behindern deshalb die kleineren, leichteren Teilchen – sie halten sie gewissermaßen „fest“.

Diesen Festhalteeffekt kann man noch steigern, wenn man den Stoßprozess zwischen den Teilchen so gestaltet, dass ihnen Bewegungsenergie abhanden kommt. Größere Partikel aus (klebrigem) Fruchtgummi leisten hier gut Dienste. Sie verdeutlichen modellhaft unelastische Stöße zwischen den Teilchen der Saturnringe.

Insgesamt ergibt sich aus den Modellversuchen: Sind im Ring Teilchen mit unterschiedlichen Abmessungen und hoher Teilchendichte, die zudem unelastisch aneinander stoßen, dann werden Ausreißer relativ schnell wieder eingefangen. Bekanntlich kann man durch Auszählen der Teilchen in verschiedenen Höhenschichten des Schüttelapparates eine **exponentielle** Abnahme der Teilchenanzahlen mit wachsender Höhe feststellen. Wir erwarten für die vertikale Teilchenverteilung in einem Planetenring, dass sie ein weitgehend ähnliches Verhalten zeigt (Abb. 2).

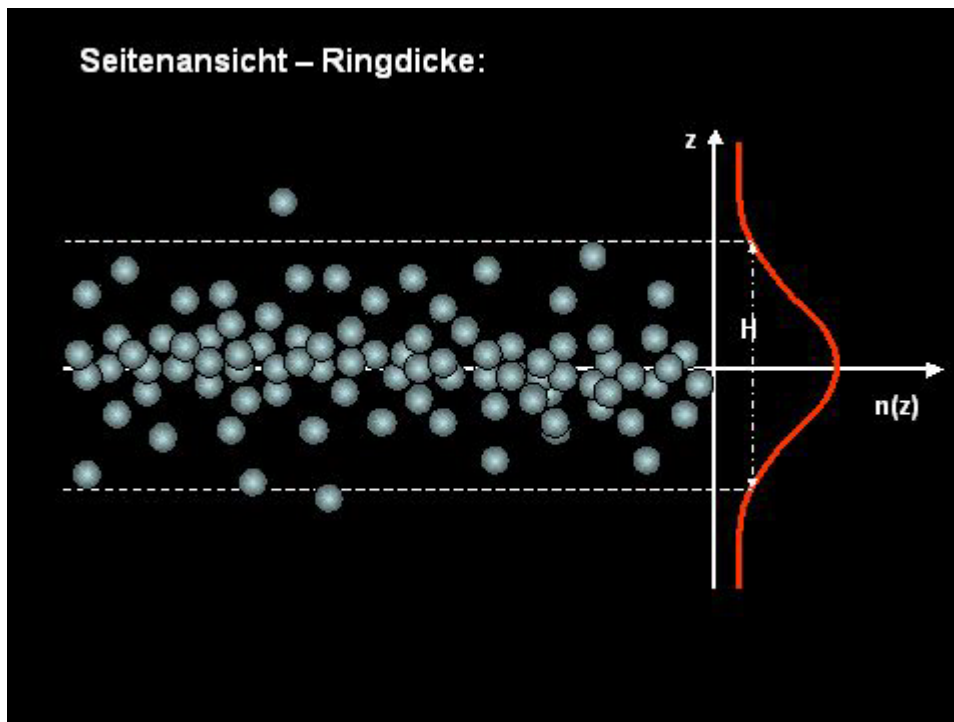


Abbildung 2: Zur Höhenverteilung der Teilchen im Ring

Wieso sind die Saturnringe so gut wie undurchsichtig? (Niveau Sek. II)

Das Ringmaterial besteht überwiegend aus kleinen Wassereispartikeln, die wie Minisatelliten um Saturn kreisen. Ihre Größe schwankt zwischen einigen Zentimetern und rund zehn Metern. Die kleineren Partikel sind weitaus häufiger.

Um *prinzipiell* die Frage zu beantworten, weshalb die Saturnringe trotz ihrer geringen Dicke (fast) undurchsichtig sind, kann man ein einfaches geometrisches Modell der Lichtausbreitung betrachten. Während die Lichtausbreitung in der Realität durch verschiedene physikalische Prozesse beeinflusst wird (Vorwärts- und Rückwärtsstreuung an den kleinsten Partikeln, Mehrfachreflexion an Partikeln usw.), konzentrieren wir uns lediglich auf die Abschattung, welche die Materiebrocken verursachen (Abb. 3).

Draufsicht – Flächendichte – optische Tiefe

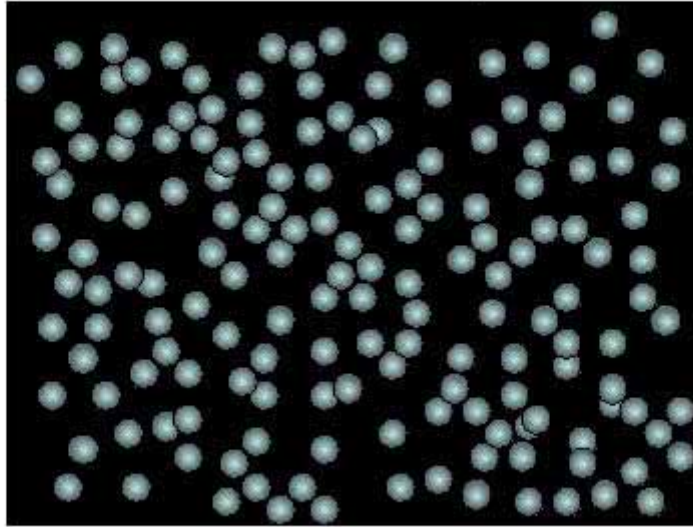


Abbildung 3: Die Ringteilchen verdecken mit ihrer Querschnittsfläche den Blick auf die „hinter“ dem Ring befindlichen Objekte.

Modellhaft gehen wir, entsprechend den Angaben im Referenzartikel, für den A-Ring von 100000 Teilchen mit dem Radius 50cm in einer Box der Oberfläche $A=500\text{m}\times 500\text{m}$ und der Dicke 50m aus. Wir zerlegen den Ring gedanklich in 50 horizontale „Scheibchen“ der Dicke 1m (siehe Abb. 4). Dann befinden sich im Mittel in jeder dieser Scheibchen 2000 Partikel, die wir uns kugelförmig denken wollen. Bei senkrechten Lichteinfall schatten die Teilchen in einer Schicht 0,63% des einfallenden Lichtes ab, denn vom Scheibenausschnitt der Fläche A wird (annähernd) die Fläche $A_T=2000\cdot\pi\cdot R^2$ durch die kugelförmigen Ringpartikel bedeckt. Es gilt

$$\frac{A_T}{A} = \frac{2000 \cdot \pi \cdot R^2}{500 \cdot 500} = 0,63\% . \quad (6)$$

Anders ausgedrückt: Nach dem Passieren von einer Teilchenschicht der Dicke 1m sind im Mittel noch 99,37% des an der Oberseite angekommen Lichtes der Intensität I_0 übrig geblieben. So wird es nun „Scheibchen“ für „Scheibchen“ weiter gehen, sodass nach der n-ten Scheibe die Intensität des Lichtes auf

$$I = I_0 \left(\frac{A_T}{A} \right)^n = I_0 \cdot 0.9937^n \quad (7)$$

gesunken ist. Bei unseren 50 Scheibchen ergibt das 73% der Ausgangsintensität. Man könnte also senkrecht zur Scheibenebene noch ganz gut durch die Scheibe hindurchsehen. Allerdings blickt man von der Erde aus zumeist unter einem sehr flachen Winkel β auf die Scheibenebene, sodass der Lichtweg in der Scheibe deutlich größer wird. Die Abbildung 4 verdeutlicht diesen Sachverhalt.

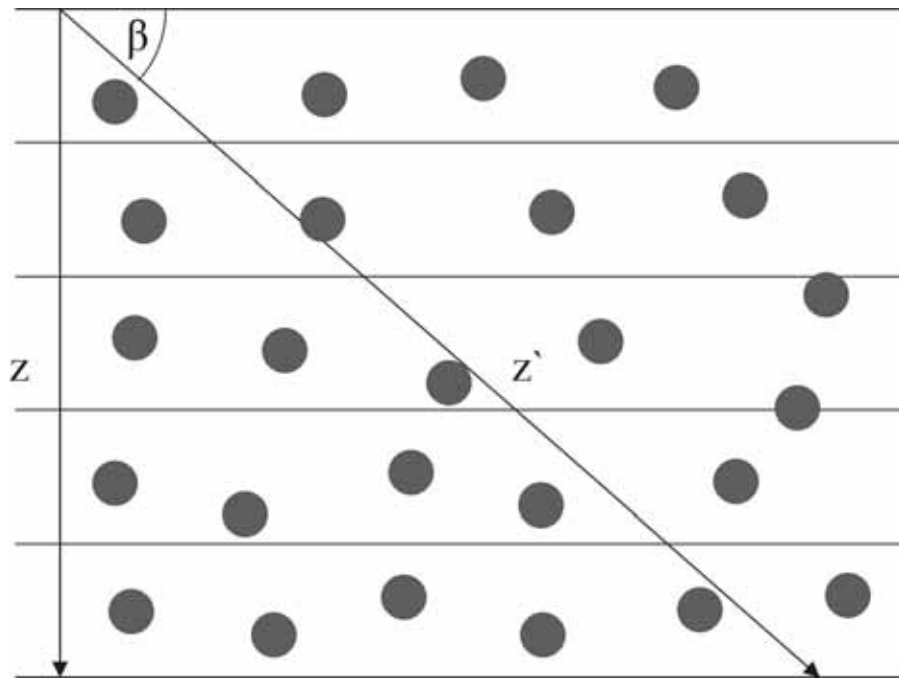


Abbildung 4: Der Lichtweg durch die Scheibe bei senkrechter und bei einer „flachen“ Blickrichtung.

In einer homogenen Scheibe gilt für den Lichtweg z' der Zusammenhang

$$z' = \frac{z}{\sin \beta}, \quad (8)$$

oder für unser konkretes Beispiel anschaulich ausgedrückt: Das Licht durchläuft nicht 50 Schichten der Dicke 1m, sondern $50/\sin\beta$ Schichten. Für einen typischen Beobachtungswinkel von $\beta=10^\circ$ ergibt sich ein Lichtweg von 288m bzw. 288 Schichten der Dicke 1m. Aus der Gleichung (7) folgt, dass für $\beta=10^\circ$ nur noch 16% des Lichtes ungehindert durch den Ring hindurchlaufen. Der Ring ist unter diesem Blickwinkel fast undurchsichtig.

Wie entstehen typische Ringstrukturen? (Niveau Sek. I+II)

Verschiedene Strukturprinzipien, die zur Entstehung der feingliedrigen Ringe führen, hat man theoretisch gut verstanden. (siehe Referenzartikel). Für die großen Ringlücken sind Resonanzen zu massereichen Saturnmonden verantwortlich, schmale Ringe werden offenbar in vielen Fällen durch Hirtenmonde zusammengehalten.

Zwischen den mit Materie besetzten Ringen befinden sich nahezu leergefegte Lückenregionen. Nach dem 3. Keplerschen Gesetz muss ein Körper in einer bestimmten Entfernung r zum Bahnzentrum eine definierte Umlaufzeit T besitzen. Umkreist ein noch weiter entfernter Mond das Bahnzentrum mit der doppelten Umlaufzeit, dann begegnen sich der Ringkörper und der Mond immer in der gleichen Raumlage. Beide beeinflussen sich dabei gravitativ, was dazu führt, dass das massearme Ringteilchen allmählich aus seiner Umlaufbahn geworfen wird.

Die bekannteste Lücke im Saturnring, die sogenannte Cassinische Teilung, beruht auf Resonanzen zu den Saturnmonden Mimas ($2T$), Enceladus ($3T$), Tethys ($4T$) und Dione ($6T$). Die Abbildung 5 stellt den Resonanzeffektes grafisch dar.

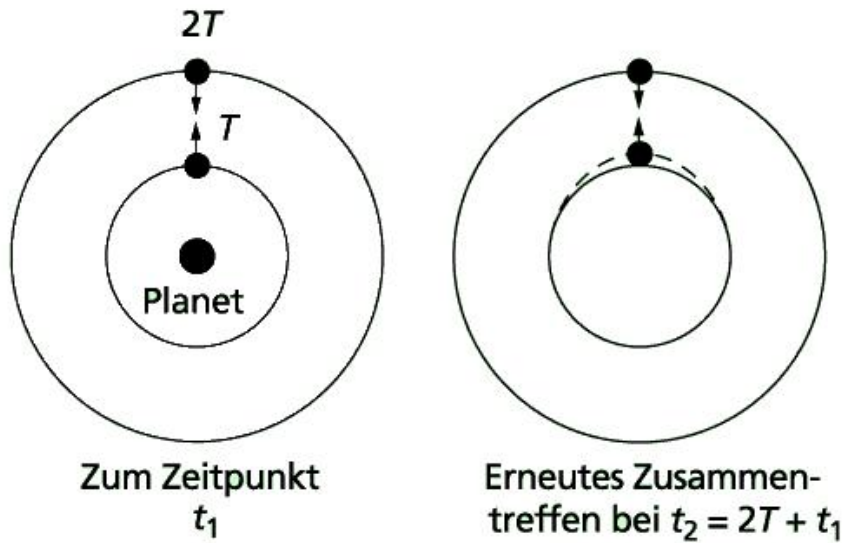


Abbildung 5: Die Entstehung der Ringlücken durch Resonanzen

Ein schmaler Ring kann durch zwei relativ massereiche Hirtenmonde zusammengehalten werden, wenn einer von ihnen am inneren und einer am äußeren Rand des Ringes umläuft (Abb. 6). Nach dem 3. Keplerschen Gesetz erfolgt die Bahnbewegung des inneren Mondes schneller als die des äußeren. Der innere Mond überholt die Teilchen im Ring und beschleunigt sie dabei. Dies führt zu ihrer Bahnanhebung. Der äußere Ring bleibt hinter der Ringmaterie zurück und bremst sie deshalb ab. Sie sinkt etwas in Richtung des Planeten herab. Beide Effekte gemeinsam bewirken eine Materiekonzentration in der Mitte des Ringes.

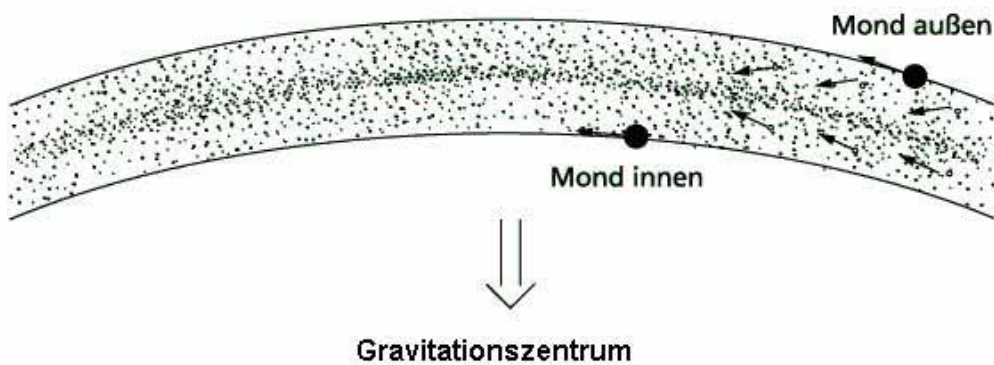


Abbildung 6: Das Hirtenmondprinzip in elementarisierter Darstellung