23.03.2021

Das Lambert-Beersche Gesetz

<u>Geschichte</u>

Das Bouguer-Lambertsche Gesetz wurde von Pierre Bouguer (1698 bis 1758) vor dem Jahre 1729 formuliert und beschreibt die Abschwächung der Strahlungsintensität mit der Weglänge beim Durchgang durch eine absorbierende Substanz. Es wird auch Johann Heinrich Lambert (1728 bis 1777) zugeschrieben, teils sogar als Lambertsches Gesetz bezeichnet, obwohl sich Lambert selbst auf Bouguers Werk „Essai d'optique sur la gradation de la lumière" in seiner „Photometria" (1760) bezieht und sogar daraus zitiert.

Im Jahre 1852 erweiterte August Beer (1825 bis 1863) das Bouguer-Lambertsche Gesetz, indem er die Konzentration des Absorbanten in Abhängigkeit zum transmittierten Licht stellte. Dieser Zusammenhang wird als Lambert-Beersches Gesetz (seltener Bouguer-Lambert-Beersches Gesetz) bezeichnet.

<u>Das Gesetz</u>

Das Lambert-Beersche Gesetz beschreibt die Abschwächung der Intensität einer Strahlung in Bezug zu deren Anfangsintensität beim Durchgang durch ein Medium mit einer absorbierenden Substanz in Abhängigkeit von der Konzentration der absorbierenden Substanz und der Schichtdicke.

Bestandteile: die Strahlungstransportgleichung
https://de.wikipedia.org/wiki/Strahlungstransport
das Absorptionsgesetz
https://de.wikipedia.org/wiki/Absorptionsgesetz_(Physik)

Ein Maß für die Abschwächung einer Strahlung nach Durchqueren eines Mediums ist die Extinktion *E.* Extinktion ist die Absorbanz des Materials für Licht der Wellenlänge *λ.* Sie ist abhängig von der Wellenlänge *λ* der Strahlung und hat die Form

$$E_\lambda = \log_{10}\left(\frac{I_0}{I_I}\right) = \varepsilon_\lambda \cdot c \cdot d \tag{1}$$

mit

- I_0 : Intensität des einfallenden (eingestrahlten) Lichtes (Einheit $W{\cdot}m^{-2}$)
- I_I : Intensität des transmittierten Lichtes (Einheit $W{\cdot}m^{-2}$)
- c : Stoffmengenkonzentration der absorbierenden Substanz in der Flüssigkeit (Einheit $mol{\cdot}m^{-3}$)
- ε_λ: dekadischer Extinktionskoeffizient (auch spektraler Absorptionskoeffizient bezeichnet) bei der Wellenlänge *λ*. Dieser ist eine für die absorbierende Substanz spezifische Größe und kann unter anderem vom pH-Wert oder vom Lösungsmittel abhängen. Bei einer Konzentrationsangabe in Mol wird ε_λ als dekadischer molarer Extinktionskoeffizient angegeben, beispielsweise in der Einheit $m^2{\cdot}mol^{-1}$
- d : Schichtdicke des durchstrahlten Körpers (Einheit *m*)

Die Strahlungstransportgleichung

Ausgangspunkt für die Berechnung des Strahlungstransports ist die Strahlungstransportgleichung. Sie verknüpft die Strahlungsdichte *L* mit dem Absorptionskoeffizienten *κ*, dem Streukoeffizienten *σ* und der Emissionsleistung *j* des zu passierenden Materials. Dabei hängen die Absorptions- und Streukoeffizienten, sowie die Emissionsleistung u. a. von der Dichte und der Temperatur des Materials ab. In der Astrophysik, so auch in den folgenden Gleichungen, wird jedoch die Strahlungsdichte *L* als *spezifische Intensität* I bezeichnet. In einer einfachen eindimensionalen, zeitunabhängigen Form lautet sie:

$$\frac{dI}{dz} = -(k + \sigma)I + j \qquad (2)$$

Unter Strahlungstransport (auch Strahlungstransfer) versteht man die Beschreibung der Ausbreitung von Strahlung durch ein Medium. Strahlungstransport spielt vor allem in der Astrophysik eine wesentliche Rolle. So basiert die Theorie der Sternatmosphären, die Bildung der Sternspektren oder die Bildung interstellarer Linienspektren auf dem Strahlungstransport.

Der Prozeß

Breitet sich elektromagnetische Strahlung in einem Medium aus, unbeachtet, ob in der Photonen- oder der Feldbetrachtung, wird sie vom Medium, insbesondere von dessen Atomen und Ionen, absorbiert, gestreut oder sie kann das Medium verlassen. Diese Prozesse heißen *Strahlungstransport*. Bei einem solchen Prozeß wird die Strahlung verschiedener Wellenlängen in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Mediums, insbesondere dessen Atomen und Ionen, verschieden beeinflußt. Ziel einer Strahlungs-Transportberechnung ist es, die Strahlung entweder als ganzes Spektrum oder als einzelne Spektrallinien bzw. das Strahlungsfeld im Inneren des Mediums zu berechnen, entweder zum Erhalt eines Spektrums, oder für Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des Mediums.

Das Absorptionsgesetz

Das Absorptionsgesetz sagt aus, daß in einem homogenen Medium die Menge dI der in einer Schicht der Dicke *dr* absorbierten Photonen in der Distanz *r* proportional zur dort bestehenden Teilchenstromdichte $I(r)$ der Strahlung ist:

$$\frac{dI}{dr} = -\mu \cdot I(r) \qquad (3)$$

μ - Absorptionskoeffizient des Mediums.

Die Lösung dieser Differentialgleichung ist

$$I(r) = I(0) \cdot e^{-\mu r} \qquad (4)$$

$I(0)$ ist die am Abstrahlungspunkt herrschende Strahlungsintensität.
$I(r)$ ist die Strahlungsintensität in der Entfernung *r* vom Abstrahlungspunkt.

Grundsätzlich gilt:

Jegliche Strahlungsausbreitung unterliegt dem Lambert-Beerschen Gesetz und damit auch dem Absorptionsgesetz.

Schlußfolgerungen und Kritiken

Das Ignorieren des Absorptionsgesetzes bei der Berechnung der Strahlungsausbreitung im Raum, das man an verschiedenen Stellen in der theoretischen Physik vorfinden kann, hat schwerwiegende Folgen für verschiedene theoretische Modelle. Diese Folgen werden nachfolgend an zwei Beispielen gezeigt.

1. Beispiel: Die beschleunigte Expansion des Universums

Im Jahre 1929 hatte der amerikanische Astronom Edwin Hubble (1889 bis 1953) die Rotverschiebung der Strahlungsspektren entfernter kosmischer Objekte entdeckt. Er hatte festgestellt, daß die Größe der Rotverschiebung von der Entfernung des Objektes direkt abhängt.

Bei der nachfolgenden Beurteilung dieser Spektralverschiebung in den Rotbereich und der Suche nach den Ursachen dafür wurde jedoch das Absorptionsgesetz nicht berücksichtigt. Die Erklärung der Rotverschiebung wurde statt dessen ausschließlich mit dem Doppler-Effekt der Frequenzverschiebung von strahlenden Objekten vorgenommen, die sich vom Beobachter fortbewegen.

Der Doppler-Effekt ist die zeitliche Stauchung bzw. Dehnung eines Signals bei Veränderungen des Abstands zwischen Sender und Empfänger während der Dauer des Signals. Der Effekt wurde 1842 vom österreichichen Mathematiker und Physiker Christian Doppler (1803 bis 1853) mathematisch erfaßt.

Wie oben bereits festgestellt, muß jedoch grundsätzlich davon ausgegangen werden, daß jegliche Strahlung bei der Ausbreitung in einem Medium dem Absorptionsgesetz unterliegt. Das Unterlassen der Berechnungen einer Strahlungsausbreitung auf der Grundlage des Absorptionsgesetzes führt zu falschen oder unbrauchbaren Ergebnissen.

In der gegenwärtig praktizierten theoretischen Physik wird der durch die Absorption der Strahlung eintretende Energieverlust

$$\Delta E = h \cdot \Delta f \tag{5}$$

mit h – Plancksches Wirkungsquantum
Δf – dem Energieverlust ΔE äquivalente Frequenzverschiebung

auf den Durchquerungswegen durch das Medium in die Berechnung der Rotverschiebung nicht einbezogen. Die durch das Absorptionsgesetz bestehende direkte Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der Entfernung der Objekte wird nicht beachtet. Stattdessen wird die Rotverschiebung ausschließlich als Doppler-Effekt auf Grund Fortbewegungsgeschwindigkeit der Strahlungsquelle interpretiert, der man zuordnet, sie werde mit zunehmender Entfernung größer. Dies ist jedoch eine nicht belegbare, spekulativ festgtlegte Annahme. Aus dieser Annahme heraus wurde die Schlußfolgerung einer beschleunigten Expansion des Universums abgeleitet.

Tatsächlich aber besteht ein naturwissenschaftlich belegbarer Zusammenhang zwischen der Rotverschiebung und <u>der Entfernung</u> des Objektes, der durch das Absorptionsgesetz gegeben ist (4), nicht aber zwischen der Rotverschiebung und <u>der Geschwindigkeit</u> des Objektes mit der Folge einer Doppler-Verschiebung der Frequenz. Hubble selbst hatte die These des Doppler-Effektes anfangs vertreten, sie aber schon 1930 unter Hinweis auf „andere Einflüsse“ verworfen. Trotzdem hält die heutige Physik unveränderlich an der Doppler-Erklärung fest. Aus den obigen Darlegungen heraus muß davon ausgegangen werden, daß die Doppler-Erklärung der Rotverschiebung der Spektren entfernter Objekte falsch ist. Das führt unmittelbar zu dem Schluß, daß es keine beschleunigte Expansion des Universums gibt.

<u>2. Beispiel: Das Olberssche Paradoxon</u>

Das sogenannte Olberssche Paradoxon beschreibt einen vermeintlichen Widerspruch zwischen der Wahrnehmung des dunklen Nachthimmels und der Einstrahlung des Sternenlichts. Heinrich Olbers (1758 bis 1840) betrachtet eine um die Erde gelegte große Kugelschale mit dem Radius r und der Dicke dr. Das Volumen dieser Kugelschale und auf ihm fußend die Anzahl Z der darin enthaltenen Sterne ist dann proportional zu r^2:

$$Z \sim r^2. \tag{6}$$

Die Intensität I des Lichtes von jedem Stern ist umgekehrt proportional r^2 (Flächendispersion):

$$I \sim 1/r^2. \tag{7}$$

Nach Olbers ist folglich die Intensität des Lichtes aus einer Kugelschale $I_s = Z \cdot I$ proportional zu r^2/r^2:

$$I_s = Z \cdot I \sim r^2/r^2 = 1, \tag{8}$$

so daß sich beide Entfernungsabhängigkeiten aufheben und die gesamte Intensität allen Sternenlichts aus dieser Kugelschale unabhängig von r ist. Die gesamte Intensität des Lichtes aus dem Universum I_t ist folglich proportional der Summe der Intensitäten aller Kugelschalen:

$$I_t \sim \int_0^\infty I_s \cdot dr \sim \int_0^\infty \frac{r^2}{r^2} \cdot dr \longrightarrow \infty \tag{9}$$

Daraus schlußfolgerte Olbers, daß unter diesen Voraussetzungen nach entsprechend langer Zeit das Licht eines Sterns aus jeder Richtung die Erde erreicht haben und der Himmel deshalb mindestens so hell wie die Sternenoberfläche erscheinen müsse. Dies widerspräche aber der Beobachtung eines dunklen Nachthimmels. Der Begriff *Olbersssches Paradoxon* wurde 1952 von Hermann Bondi (1919 bis 2005) geprägt. Er bezog sich auf diese Aussage Olbers‘.

Das Olberssche Paradoxon sollte in der Kosmologie als Argument gegen unendliche isotrope und homogene Modelle des Universums dienen. Man argumentierte, um diesem Paradoxon zu entgehen, müsse davon ausgegangen werden, daß es kein unendlich ausgedehntes Universum geben kann. In Wahrheit ist das sogenannte Paradoxon lediglich ein Rechenfehler, der in der Nichtbeachtung des Absorptionsgesetzes besteht.

Berücksichtigt man den Energieverlust der Strahlung bei der Durchquerung der Distanzen im Raum nach dem Absorptionsgesetz (4), so ändert sich der Integralausdruck im Integral für die Gesamtstrahlungsintensität aller Kugelschalen und nachfolgend die Lösung des Integrals wie folgt:

$$I_t \sim \int_0^\infty \frac{r^2}{r^2} \cdot e^{-\mu r} dr = -\frac{1}{\mu} \cdot e^{-\mu r}\Big]_0^\infty = +\frac{1}{\mu} \tag{10}$$

Das heißt, es gibt ein solches Paradoxon nicht, weil die Annahme der Proportionalität $I \sim 1/r^2$ für die Strahlungsintensität falsch ist. Es verbleibt im Integral anstelle von $r^2/r^2 = 1$ die konvergente Funktion $f(r) = e^{-\mu r}$, mit der das Integral von 0 bis ∞ nicht gegen ∞ gehen kann. Der dunkle Nachthimmel steht also nicht im Widerspruch zur Einstrahlung des Sternenlichts.

Zu diesem Thema siehe auch
http://hauptplatz.unipohl.de/Wissenschaft/Assis/Uebersetzung_AssisRotverschiebung.pdf