



www.vds-astro.de

Journal für Astronomie

ISSN 1615-0880

III/2018

Nr. 66

Zeitschrift der Vereinigung der Sternfreunde e.V.



Mars und Mondfinsternis
Seite 4



Sonnenbahnsimulator
Seite 34



Fachgruppe Radioastronomie
Seite 87

Schwerpunktthema:
**Kosmische
Dynamik**

Kosmologische Entfernungen

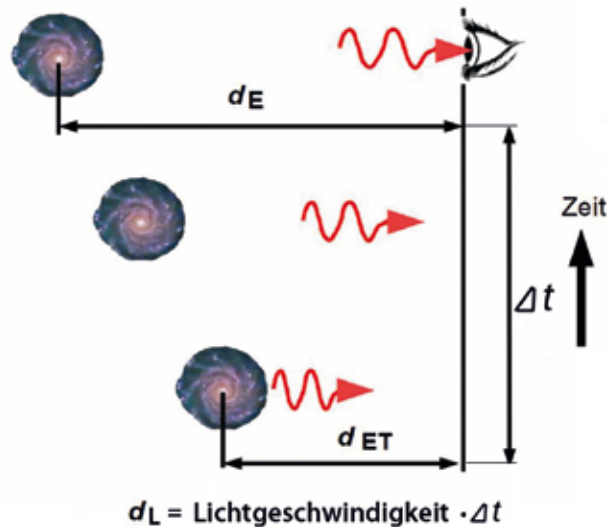
von Reiner Guse

Kosmologische Entfernungen beziehen sich hier auf Objekte, die über eine Milliarde Lichtjahre von uns entfernt sind. In diesen Bereichen gibt es mehrere Entfernungsbegriffe, die unterschiedlich definiert sind. Häufig wird auch die Rotverschiebung des Lichtes angegeben, mit der man die verschiedenen Entfernungen berechnen kann. Teilweise ist das nur mit größerem mathematischem Aufwand möglich. Im folgenden Artikel stelle ich ein Verfahren mit einem Diagramm vor, mit dem diese Entfernungen nicht nur veranschaulicht, sondern auch ohne großen Aufwand konkret bestimmt werden können. Mit dieser Methode habe ich bei der Vermittlung dieses Inhaltes bisher sehr gute Erfahrungen gemacht.

Die Expansion des Universums

Große Entfernungen im Universum werden in Parsec (pc) oder Lichtjahren (ly) angegeben. Wir verwenden bei Entfernungsangaben hier Lichtjahre, wobei ein Lichtjahr der Entfernung entspricht, die das Licht mit seiner Geschwindigkeit von ca. 300.000 km/s in einem Jahr zurücklegt. Man beachte bei den folgenden Ausführungen, dass die physikalische Größe für das Jahr die Zeit ist. Als Abkürzung verwenden wir y, für Milliarde Jahre also Gy. Das Lichtjahr ist dagegen eine Streckenangabe mit der Abkürzung ly bzw. Gly für Gigalichtjahr.

Hubble stellte 1929 fest, dass sich alle Galaxien voneinander entfernen. Die Geschwindigkeit kann dabei mit dem nach ihm benannten Hubble-Parameter berechnet werden. Geht man von einem für die heutige Zeit gültigen Wert von 22 km/s pro Mly (Megalichtjahr) aus, dann heißt das, dass sich eine Galaxie in einer Entfernung von einer Million Lichtjahren mit 22 km/s von uns entfernt, bei 2 Mly mit 44 km/s usw. Aufgrund dieses Sachverhaltes darf nicht gefolgert werden, dass wir uns im Mittelpunkt des Universums befinden, sondern das trifft für alle Galaxien und Punkte im großräumigen Weltraum zu, da die Galaxienflucht dadurch zustande kommt, dass sich der Raum zwischen ihnen ausdehnt. Diese Ausdehnung des Raumes im Universum wird als Expansion bezeichnet.



1

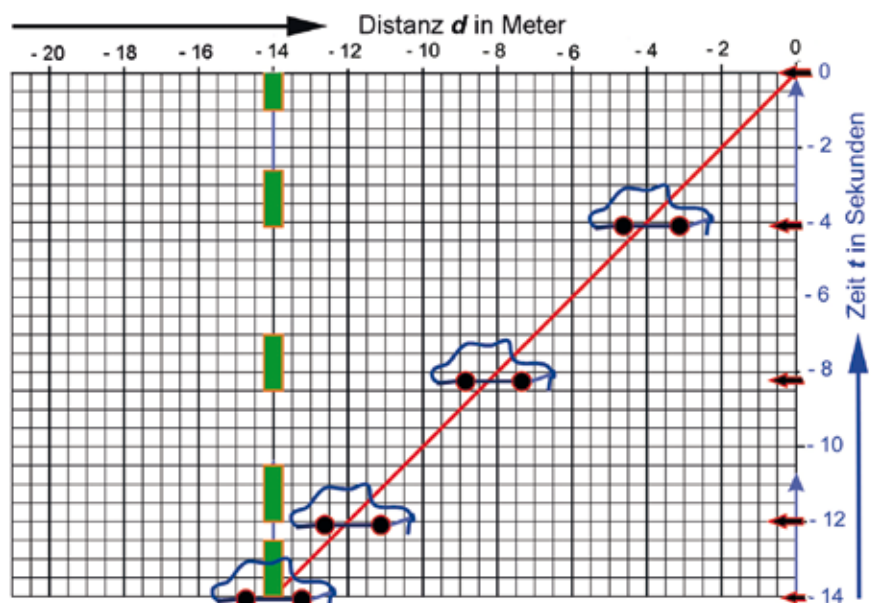
Durch die Expansion entfernt sich die Galaxie.

Auswirkungen der Expansion

Dazu schauen wir uns die Abbildung 1 an. Wir beobachten in einem Teleskop eine Galaxie, die zu diesem Zeitpunkt die Entfernung d_E hat. Das Licht, das wir von ihr empfangen, wurde aber ausgesandt, als sie nur die Entfernung d_{ET} von uns hatte. Aufgrund der Expansion hat sich die Galaxie in dem Zeitraum von der Aussendung des Lichtes bis zum Eintreffen entfernt. Auch das Licht selbst hat dabei eine bestimmte Strecke zurückgelegt. Sie wird vermutlich größer als d_{ET} und kleiner als d_E sein. Wir müssen folglich zwischen verschiedenen Entfernungen unterscheiden:

Lichtlaufstrecke d_L : Strecke, die das Licht von der Galaxie bis zu uns zurückgelegt hat.

Eigendistanz d_E : Entfernung, welche die Galaxie zum heutigen Zeitpunkt von uns hat. Sie entspricht unserem alltäglichen Verständnis von Entfernungen, wenn wir z. B. eine Länge mit einem Gliedermaßstab messen. Bezüglich der Galaxie ist so eine direkte Messung nicht möglich, da wir aufgrund der endlichen Lichtgeschwindigkeit zum heutigen Zeitpunkt gar keinen Zugang mehr zu dieser Galaxie haben.



2

Zeit-Distanz-Diagramm einer geradlinig gleichförmigen Bewegung

Eigendistanz d_{ET} : Entfernung der Galaxie zum Zeitpunkt der Lichtaussendung

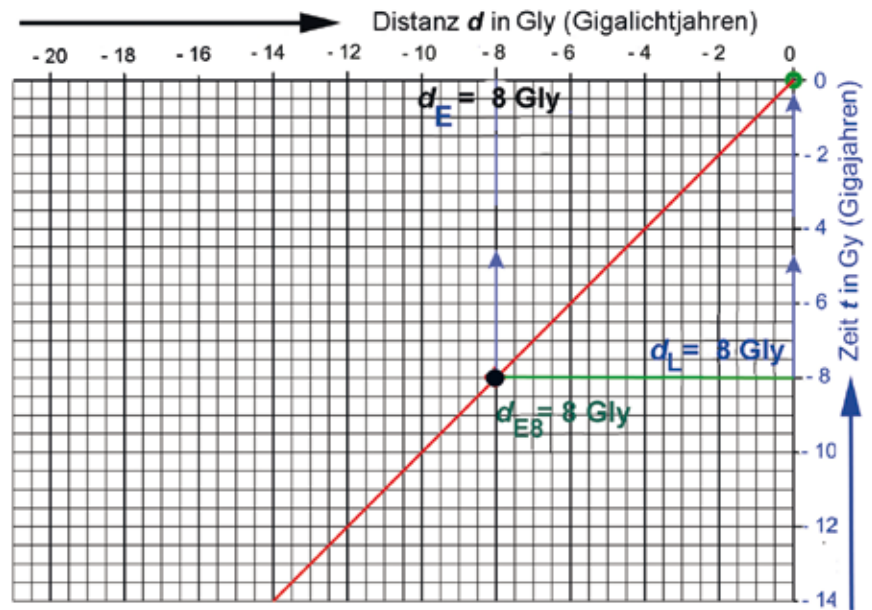
Im Zusammenhang mit astronomischen Beobachtungen sind noch zwei weitere Entfernungen von Bedeutung: Die Leuchtkraftdistanz und die Winkeldistanz. Auf sie soll hier nicht eingegangen werden, sie lassen sich jedoch aus den oben beschriebenen Distanzen leicht errechnen. Bei „nahen“ Objekten, die weniger als 1 Milliarde Lichtjahre entfernt sind, sind die Werte für alle Distanzen gleich.

Der Abbildung 1 können wir außerdem entnehmen, dass die Expansion auch das Licht selbst beeinflusst. Die Ausdehnung wirkt sich auf die Wellenlänge aus, diese wird gestreckt, sie wird größer und das Licht erscheint in einer anderen Farbe als das ausgesendete, es wird rotverschoben. Diese Rotverschiebung kann gemessen werden und ermöglicht so auch Entfernungsbestimmungen. Teilt man die beobachtete Wellenlänge durch die Wellenlänge des ausgesandten Lichtes und vermindert das Ergebnis um 1, erhält man einen Wert für die Rotverschiebung, der mit z bezeichnet wird. Sind die Wellenlängen gleich, ist der z -Wert 0, mit größerer Rotverschiebung steigt auch der z -Wert.

Ist eine der oben beschriebenen Distanzen oder ist die Rotverschiebung z bekannt, können alle anderen Werte berechnet werden. Nachfolgend möchte ich zeigen, wie mit Hilfe einer grafischen Darstellung die Zusammenhänge zwischen diesen Größen veranschaulicht und entsprechende Werte einfach ermittelt werden können. Zum besseren Verständnis gehen wir zunächst von uns vertrauten Diagrammen aus.

Zeit-Distanz-Diagramme ohne Expansion

Prinzipiell handelt es sich bei den Diagrammen um modifizierte Weg-Zeit- oder Zeit-Weg-Diagramme, wie man sie zur Beschreibung von Bewegungsabläufen kennt. In der Kosmologie werden ähnliche Darstellungen auch oft als Raum-Zeit-Diagramme bezeichnet. Da wir es bei unserem Diagramm nur mit einer Raumdimension, nämlich der Entfernung bzw. Distanz zu tun haben, bezeichnen wir sie als Zeit-Distanz-Diagramme.



3

Zeit-Distanz-Diagramm eines statischen Universums

Die Abbildung 2 zeigt ein Diagramm für einen uns vertrauten Vorgang. Ein PKW bewegt sich geradlinig mit einer konstanten Geschwindigkeit. Im Hinblick auf das Diagramm für unser Universum wurde der 0-Punkt rechts oben festgelegt. Es ist auch bei allen folgenden Diagrammen der eigene Standort zum jetzigen Zeitpunkt. Die negativen Vorzeichen kennzeichnen den Sachverhalt, dass sich der Ablauf auf die Vergangenheit bezieht.

Konkret heißt das: Vor 14 Sekunden befand sich der PKW in 14 Metern Entfernung von mir, beim grünen Turm. Vor 8 Sekunden waren es nur noch 8 Meter. Momentan ist das Auto bei mir angekommen.

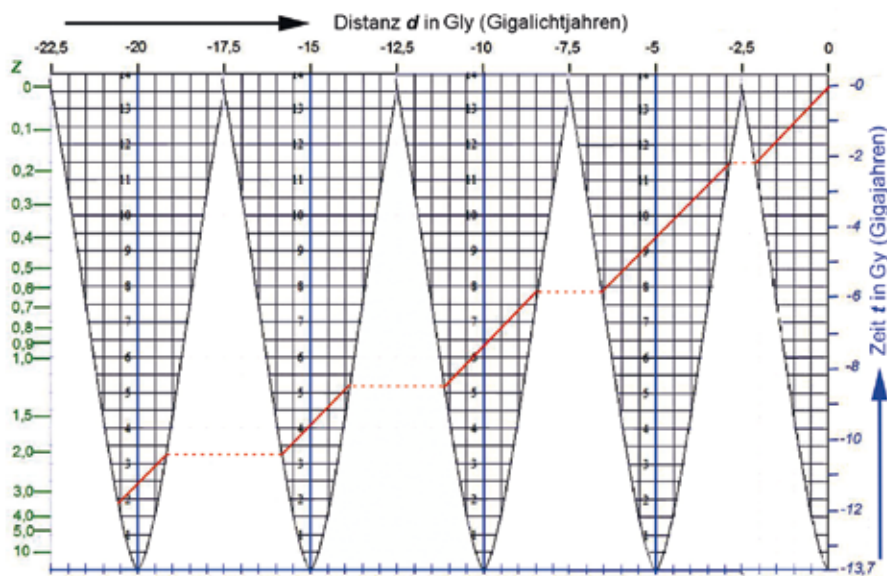
Bei diesem zeitlichen Ablauf bewegen wir uns auf dieser Karte von unten nach oben. Da sich der grüne Turm und der Beobachter nicht bewegen, verlaufen diese Linien senkrecht nach oben, beim Auto ist das durch die Bewegung nicht der Fall. Diese Linien werden auch als Weltlinien bezeichnet.

Als nächstes wollen wir ein Zeit-Distanz-Diagramm für ein nicht expandierendes Universum betrachten. Um das Alter des Universums mit 13,7 Milliarden Jahren zu berücksichtigen, werden aus Sekunden Gigajahre und aus Metern Gigalichtjahre. Die Abbildung 3 zeigt das entsprechende Diagramm. Der Verlauf

des Lichtes, das zum jetzigen Zeitpunkt bei uns eintrifft, ist als 45-Grad-Linie rot eingezeichnet. Wir betrachten eine Galaxie, deren Licht 8 Milliarden Jahre bis zu uns unterwegs war. Sie ist zum Zeitpunkt der Lichtaussendung als schwarzer Punkt markiert. Man erkennt, dass die Eigendistanz d_{ET} vor 8 Milliarden Jahren mit 8 Gly genau so groß war wie die Eigendistanz d_{E} heute und die Lichtlaufdistanz. Es gibt keine Unterschiede zwischen den Entfernungswerten.

Das Zeit-Distanz-Diagramm eines expandierenden Universums

In diesem Diagramm muss berücksichtigt werden, dass der Raum und damit auch die Distanzen im Universum mit fortschreitender Zeit größer werden. Dazu wird ein Diagramm mit Sektoren verwendet, die gemäß der Gesetzmäßigkeit zur Expansion die Form wie in der Abbildung 4 haben. Die Hüllkurven der Sektoren sind keine Geraden, sondern leicht gekrümmt, da sich der Raum nicht gleichmäßig mit der Zeit ausgedehnt hat. Durch die kariert gekennzeichneten Sektoren werden die Bereiche kenntlich gemacht, in denen sich der Raum ausdehnt. Der Verlauf des gerade einfallenden Lichtes ist wieder als rote Linie dargestellt, dabei durchläuft das Licht nur die Sektoren, die Lücken werden waagerecht übersprungen und haben keine Bedeutung. Die Breite der Sektoren entspricht der Wellenlänge des Lichtes, daher kann



4

Zeit-Distanz-Diagramm des expandierenden Universums

die Rotverschiebung aus diesen Strecken bestimmt werden, ihr Wert z ist links angegeben. Den z -Wert erhält man, indem man die Sektorbreite von heute durch die Sektorbreite zum Zeitpunkt der Lichtaussendung teilt und um 1 vermindert. Die oben angegebenen Zahlenwerte im Diagramm für d beziehen sich auf den jetzigen Zeitpunkt ($t = 0$). Für andere Zeitpunkte sind die waagerechten Strecken in den Sektoren maßgebend.

Bestimmung der Entfernungen bei gegebener Rotverschiebung

Ein Beispiel: Für eine weit entfernte Ga-

laxie wurde die Rotverschiebung von $z = 1,6$ gemessen. Mit diesem Wert sollen die Eigendistanzen und die Lichtlaufdistanz ermittelt werden. Wir betrachten dazu die Abbildung 5, wobei wie folgt vorgegangen wird:

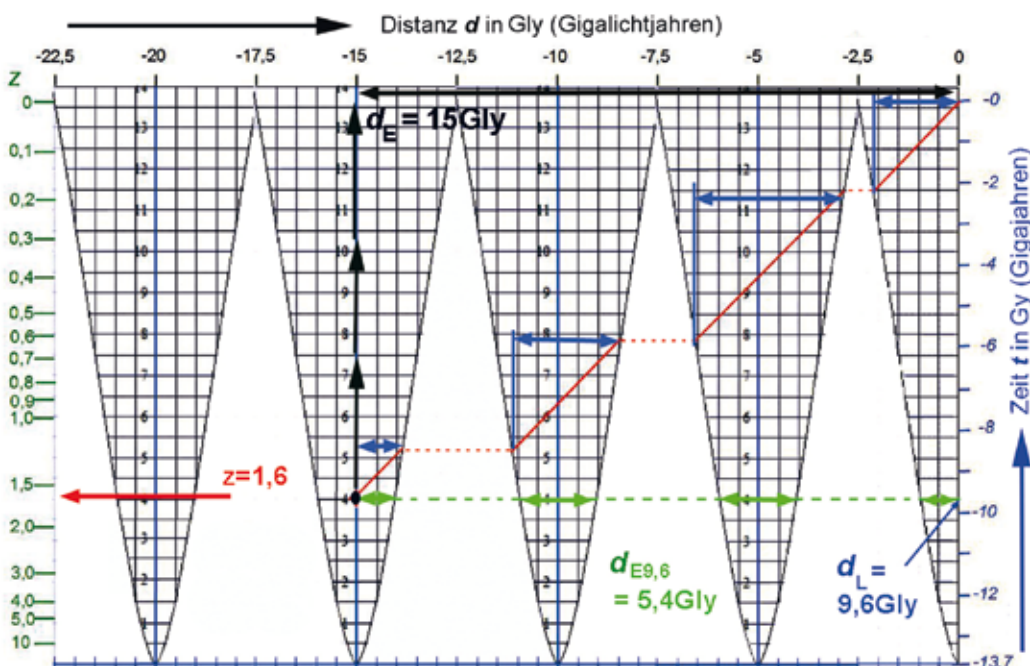
Von $z = 1,6$ ausgehend wird mit einer waagerechten Linie der Zeitpunkt der Aussendung festgelegt. Durch den Schnittpunkt mit der Zeitachse erhält man die Lichtlaufzeit $d_L = 9,6$ Gly. Der Schnittpunkt mit der roten Lichtlinie wird als Ort der Galaxie bei der Lichtaussendung markiert. Die damalige Entfer-

nung ergibt sich durch Abstandsmessung (nur die Sektorenanteile): $d_E 9,6 = 5,4$ Gly. Die heutige Eigendistanz wird oben nach senkrecht verlaufender Weltlinie abgelesen: $d_E = 15$ Gly.

Der Verlauf der Strecke, die das Licht zurückgelegt hat, wird im Diagramm auch durch die blauen Linien deutlich gemacht. Als Ergebnis erhalten wir die Eigendistanz vor 9,6 Milliarden Jahren von 5,4 Gly, die Eigendistanz heute von 15 Gly und die Lichtlaufdistanz von 9,6 Gly. Es genügt, wenn z oder einer der Entfernungswerte gegeben ist, um die anderen Werte mit Hilfe des Diagramms zu bestimmen.

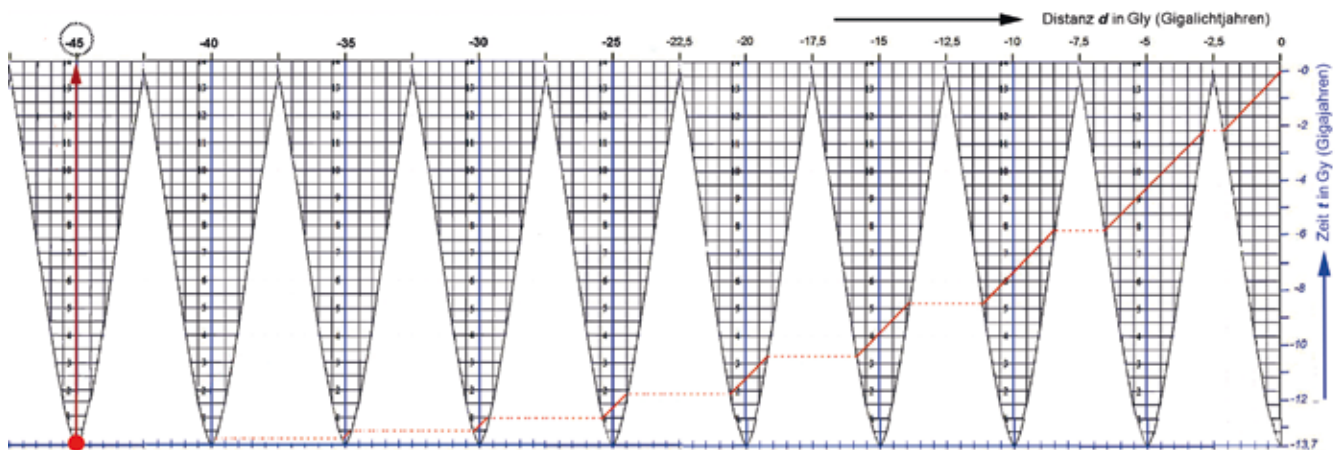
Wie groß ist unser beobachtbares Universum?

Die Größe des beobachtbaren Universums wird durch den Beobachtungshorizont (auch Partikelhorizont) bestimmt. Er gibt an, wie weit ein Objekt aktuell maximal entfernt sein kann, dessen Licht uns heute erreicht. Dazu gehen wir von dem Grenzfall des Urknalls aus. Wir müssen unser Diagramm erweitern, damit die Lichtkurve in etwa bis zum Urknall reicht. Die Abbildung 6 zeigt diese Darstellung. Wir erkennen, dass ein Objekt, dessen Licht beim Urknall ausgesandt wurde und das wir heute empfangen, zum momentanen Zeitpunkt eine Eigendistanz von etwa 45 Gly hat. Meistens wird dieser Wert heute mit 46 Gly angegeben [1].



5

Zeit-Distanz-Diagramm mit Angaben der Daten für eine Galaxie mit $z = 1,6$



6

Zeit-Distanz-Diagramm mit Erweiterung der Distanz

Ausblick

Mit diesem Zeit-Distanz-Diagramm können noch weitere Phänomene der Kosmologie behandelt und erklärt werden. Unter anderem kann man zeigen, dass durch die Expansion auch Zeitdifferenzen zwischen zwei Ereignissen von der Aussendung bis zum Eintreffen des Lichtes größer werden und man kann ermitteln, wie groß diese Abweichungen sind. Mit einer Erweiterung des Diagramms ist es außerdem möglich zu begründen, warum wir Objekte sehen bzw. wahrnehmen können, deren Expansionsgeschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit ist.

Für das Zeichnen eines Zeit-Distanz-Diagramms für das expandierende Universum eignet sich ein kariertes DIN-A4-Blatt. Vereinfacht kann man beim Zeitmaßstab von 14 Gy ausgehen und für die Hüllkurven der Sektoren Geraden verwenden. Damit erhält man auch noch akzeptable Ergebnisse.

Nähere Informationen und mathematische Hintergründe zu diesem Thema finden Sie im Internet unter [2].

Literaturhinweise und Internetlinks:

- [1] T. M. Davis und C. H. Lineweaver, 2004: „Expanding Confusion: Common Misconceptions of Cosmological Horizons and the Superluminal Expansion of the Universe“, Publications of the Astronomical Society of Australia 21, S. 97, www.mso.anu.edu.au/~charley/papers/DavisLineweaver04.pdf
- [2] R. Guse: Homepage, www.reiner-guse.de/assets/applets/Ausw_Expansion_Fer.pdf

IMPRESSUM

VdS-Journal für Astronomie · Vereinszeitschrift der Vereinigung der Sternfreunde (VdS) e.V.

Hier schreiben Mitglieder für Sternfreunde.

Herausgeber: Vereinigung der Sternfreunde (VdS) e.V.

Geschäftsstelle: Postfach 1169, D-64629 Heppenheim

Tel: 0 62 52 / 78 71 54

Fax: 0 62 52 / 78 72 20

E-Mail: service@vds-astro.de

www.vds-astro.de

Redaktion: Dr. Werner E. Celnik, Stephan Fichtner, Otto Guthier, Dietmar Bannuscher, Sven Melchert, Peter Riepe. Redaktionelle Mitarbeit der VdS-Fachgruppen-Redakteure und VdS-Mitglieder

Mitarbeit: Eva Garbe

Grafiken u. Bildbearbeitung:

Dr. Werner E. Celnik und die Autoren

Layout:

Bettina Gessinger, Dipl. Designerin

Anzeigen:

Otto Guthier c/o VdS-Geschäftsstelle

Litho und Druck:

Kullmann Verlags GbR, Stuttgart

Vertrieb:

Werner Teutsch GmbH, Laudenbach

Bezug:

„VdS-Journal für Astronomie“ erscheint viermal pro Jahr und ist im Mitgliedsbeitrag von 35,- € (EU) und 40,- € (außerhalb der EU) bzw. ermäßigt 25,- € pro Jahr enthalten

Beiträge werden erbeten an:

VdS-Geschäftsstelle, Postfach 1169, D-64629 Heppenheim und an die Redakteure der VdS-Fachgruppen (siehe Redaktionsliste).