

Von der Ameise auf dem Gummiband zur Lichtbirne im Universum:

**Ein anschauliches Verfahren zur Erklärung
kosmologischer Phänomene**

LFB Jena , 21.06.2024

Reiner Guse, Peine

Was glaubte man 1920?

Das Universum ist

statisch

auf großen
Skalen
keine
Bewegung

ewig

keine
Änderungen
mit der
Zeit



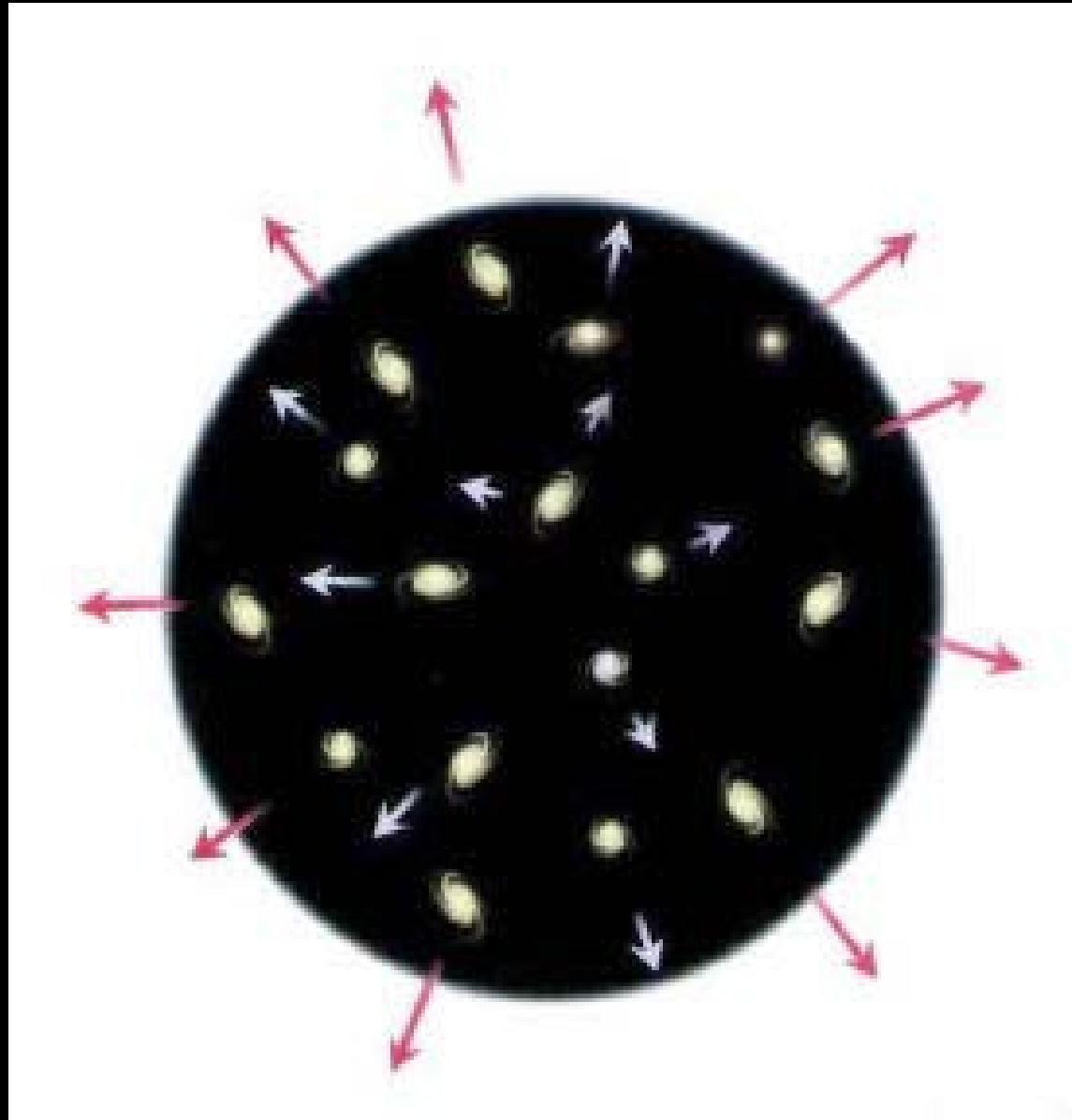
M84, M86, M87

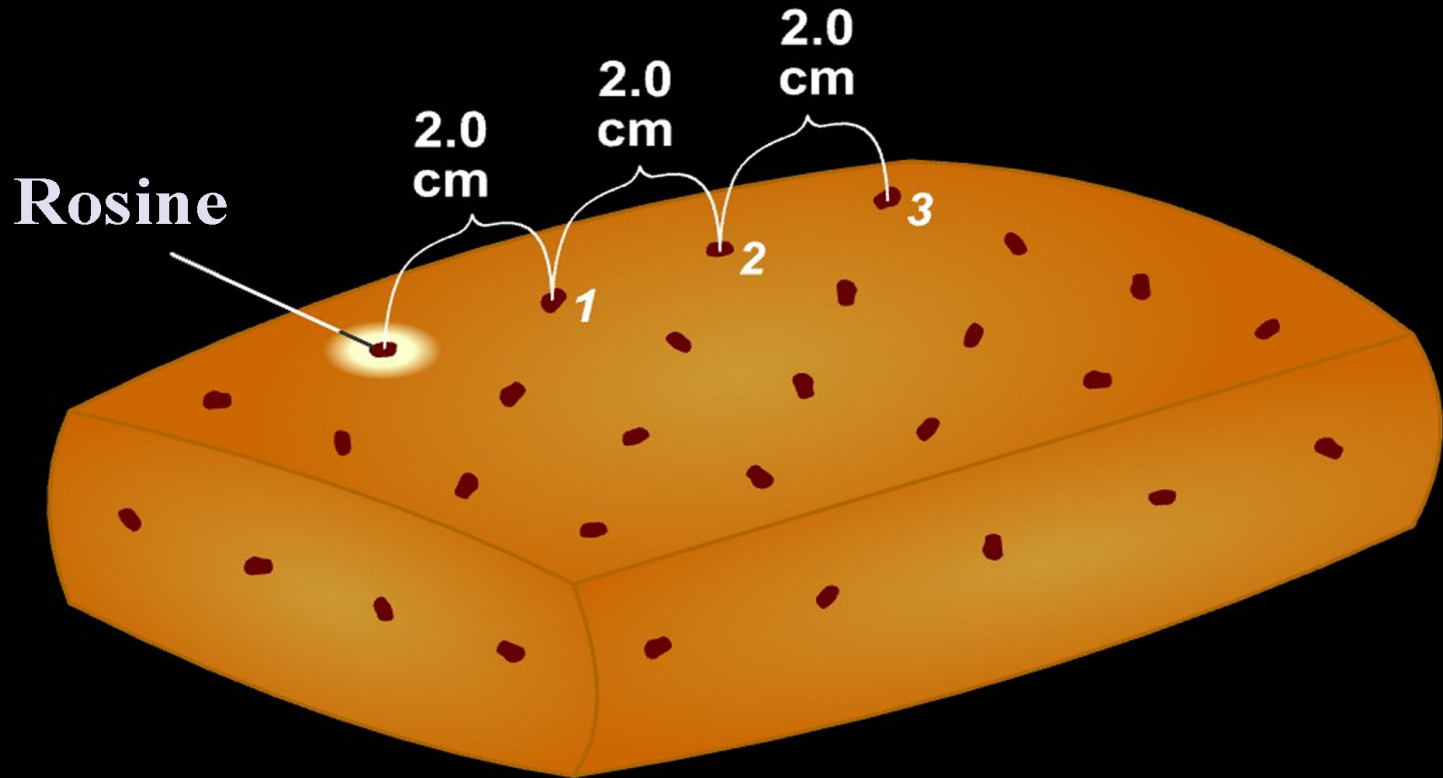
Teil des Virgo - Haufens, er besteht aus ca. 2000 Galaxien und ist etwa 65 Millionen Lichtjahre entfernt. Foto mit Borg 4 Zoll Teleskop und Canon EOS 1000Da. Peine, 30.04.2011

Hubble entdeckt die Galaxienflucht

- Die Galaxien entfernen sich von uns.
- Je weiter sie weg sind, desto schneller entfernen sie sich.
- $v = H * d$

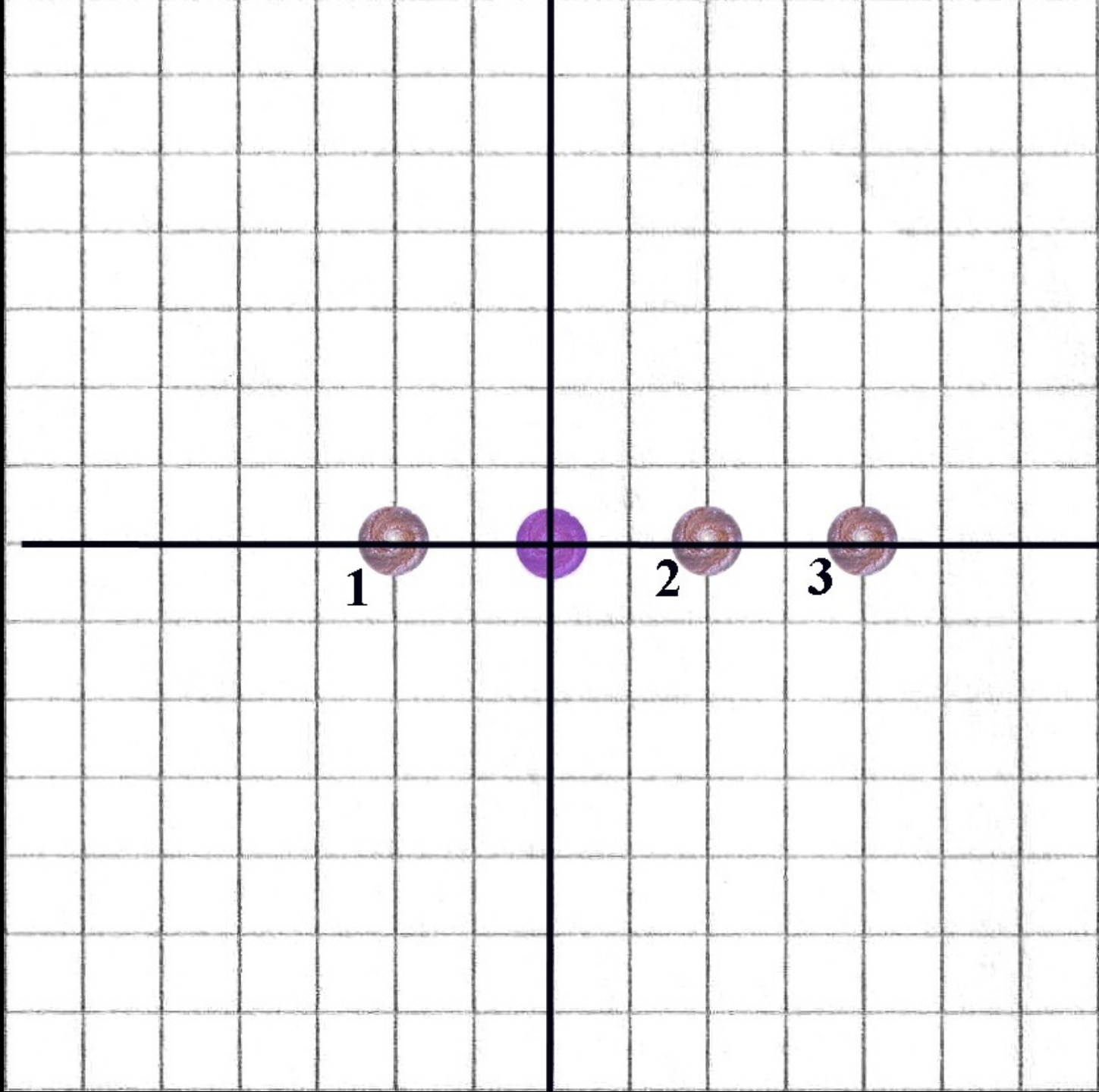
v Geschwindigkeit
 H Hubble Konstante
 d Entfernung



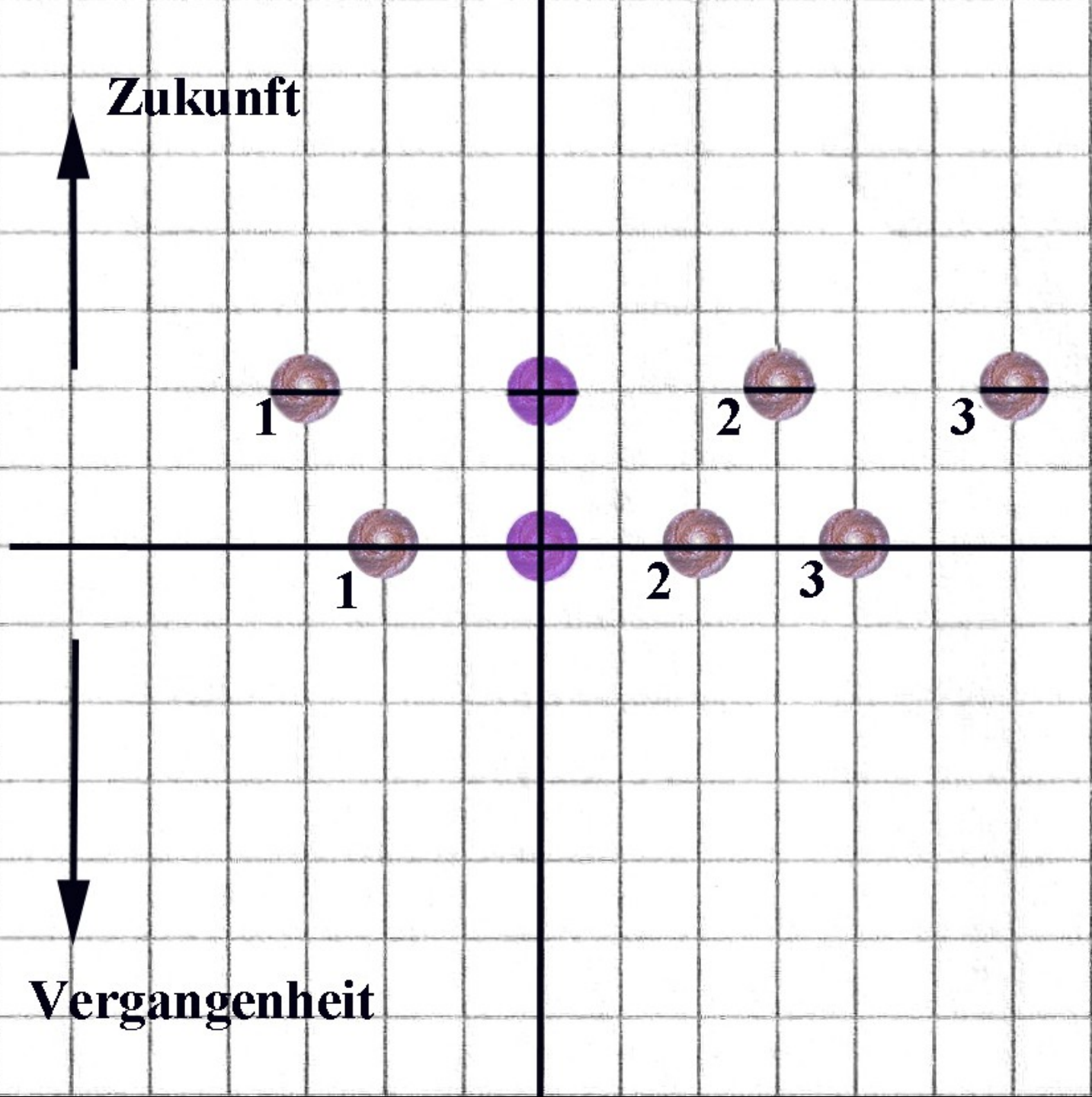


Rosinenkuchenmodell: Der Teig (Raum zwischen den Rosinen) dehnt sich aus.

Quelle: Pearson Education, Addison Wesley

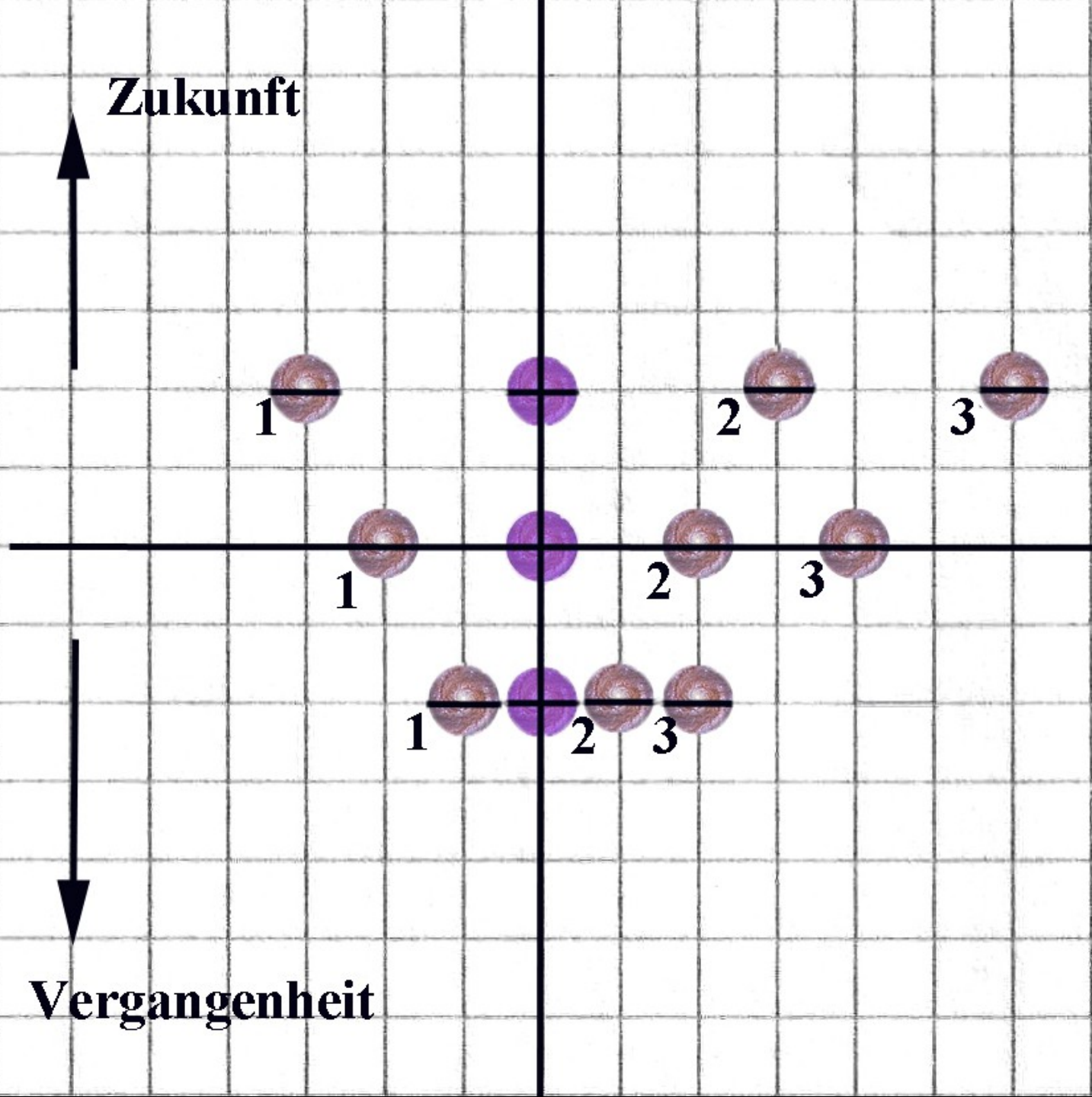


Zukunft

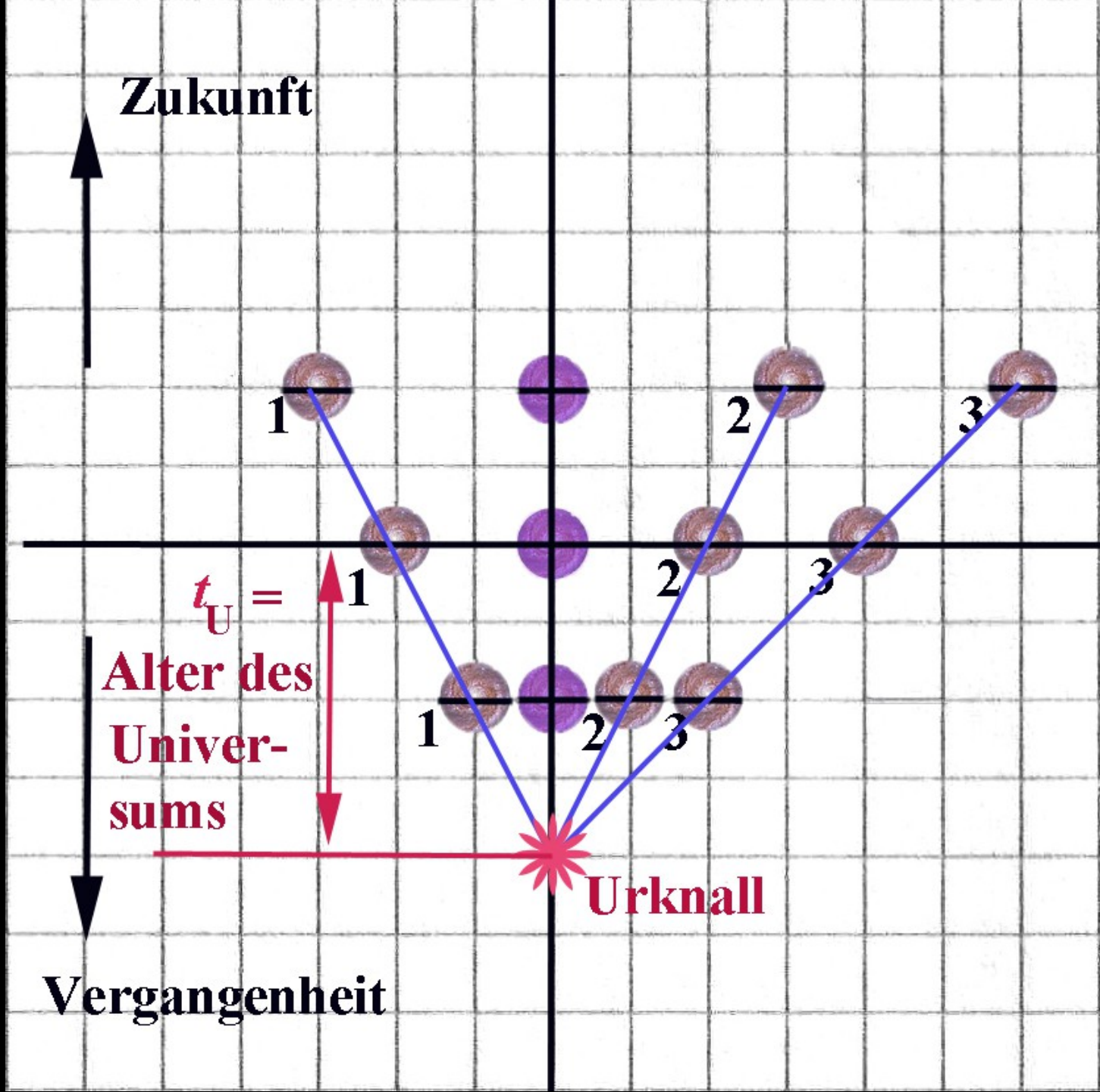


Vergangenheit

Zukunft

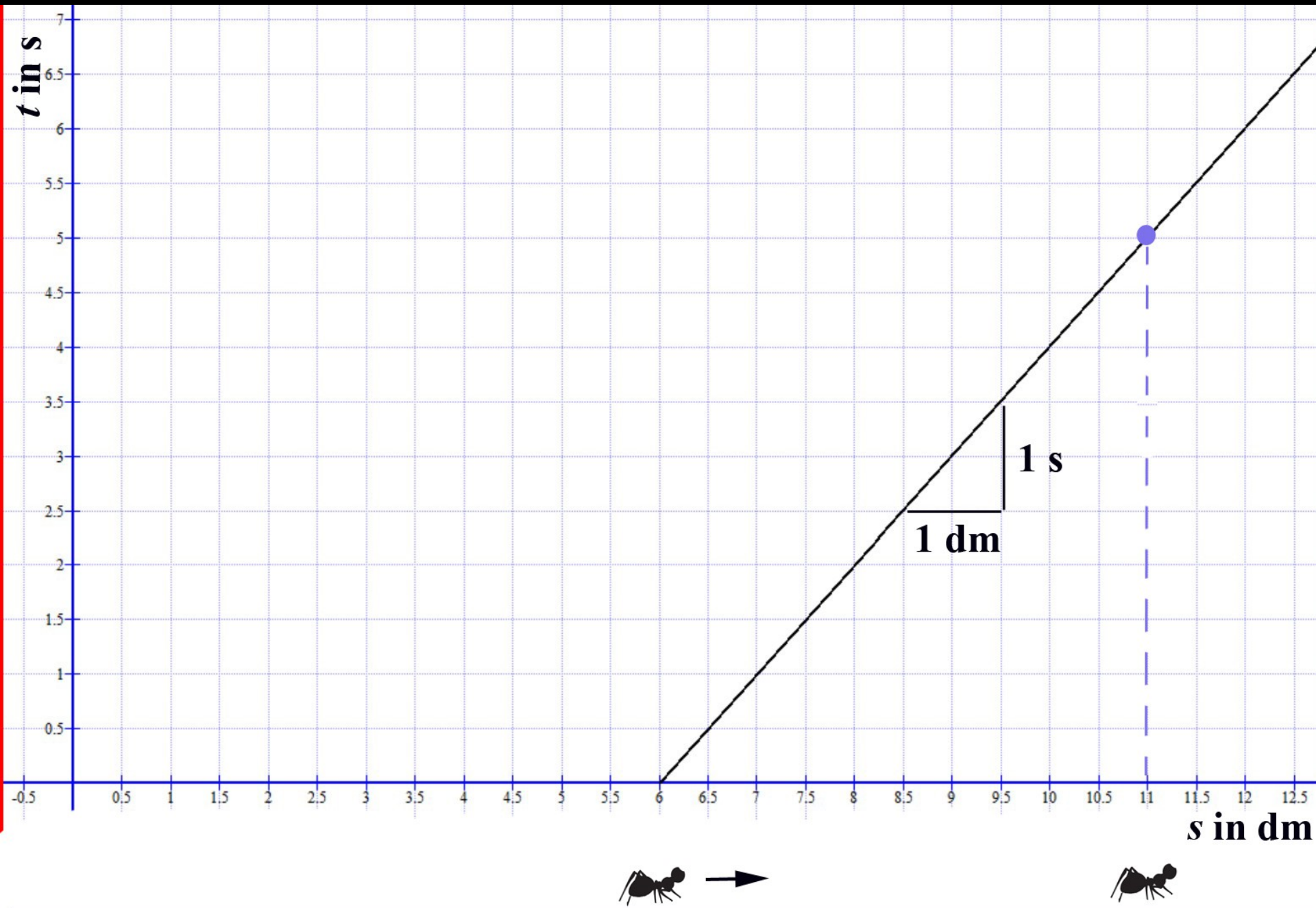


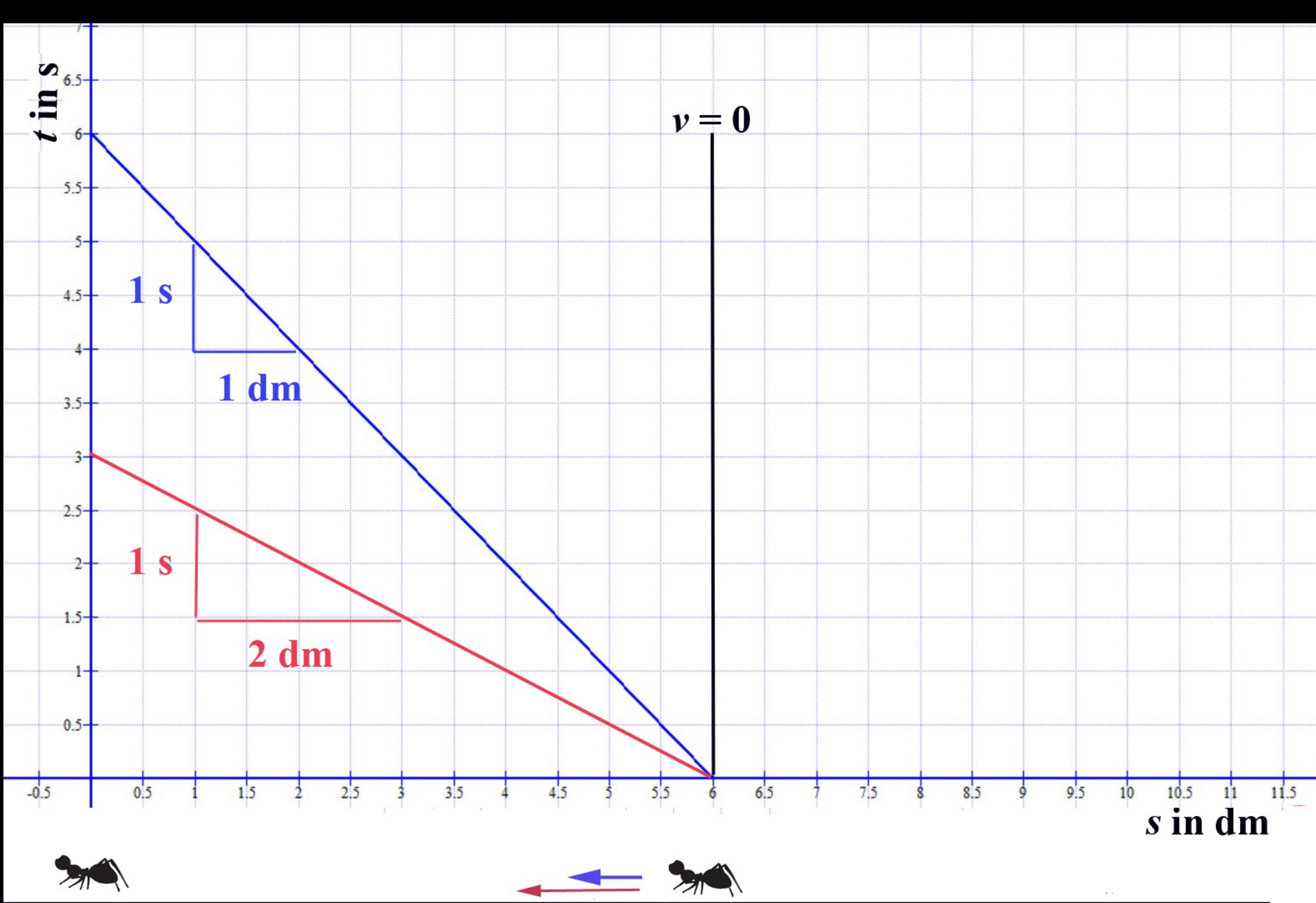
Vergangenheit



1. Ameise auf fester Oberfläche

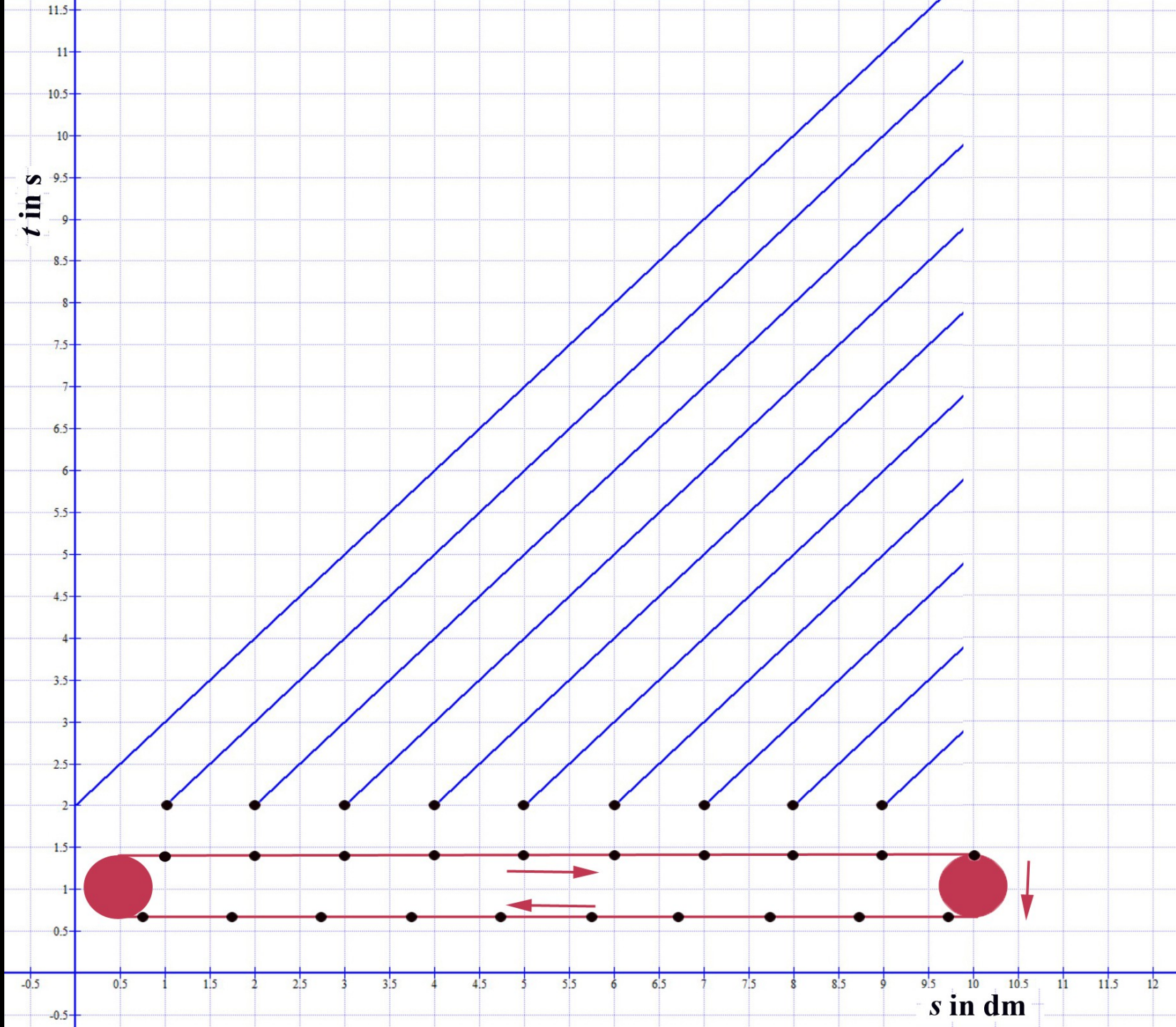


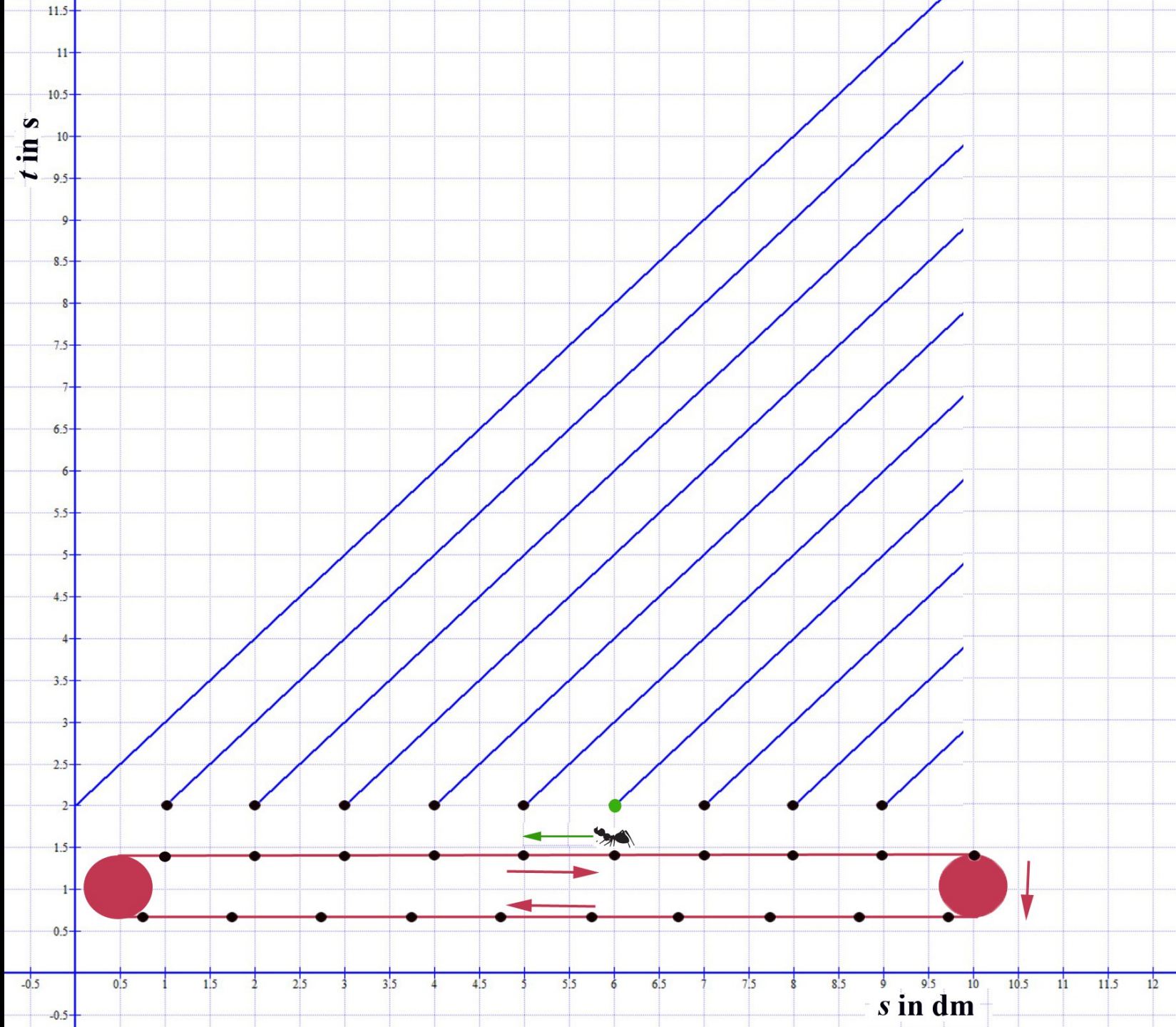


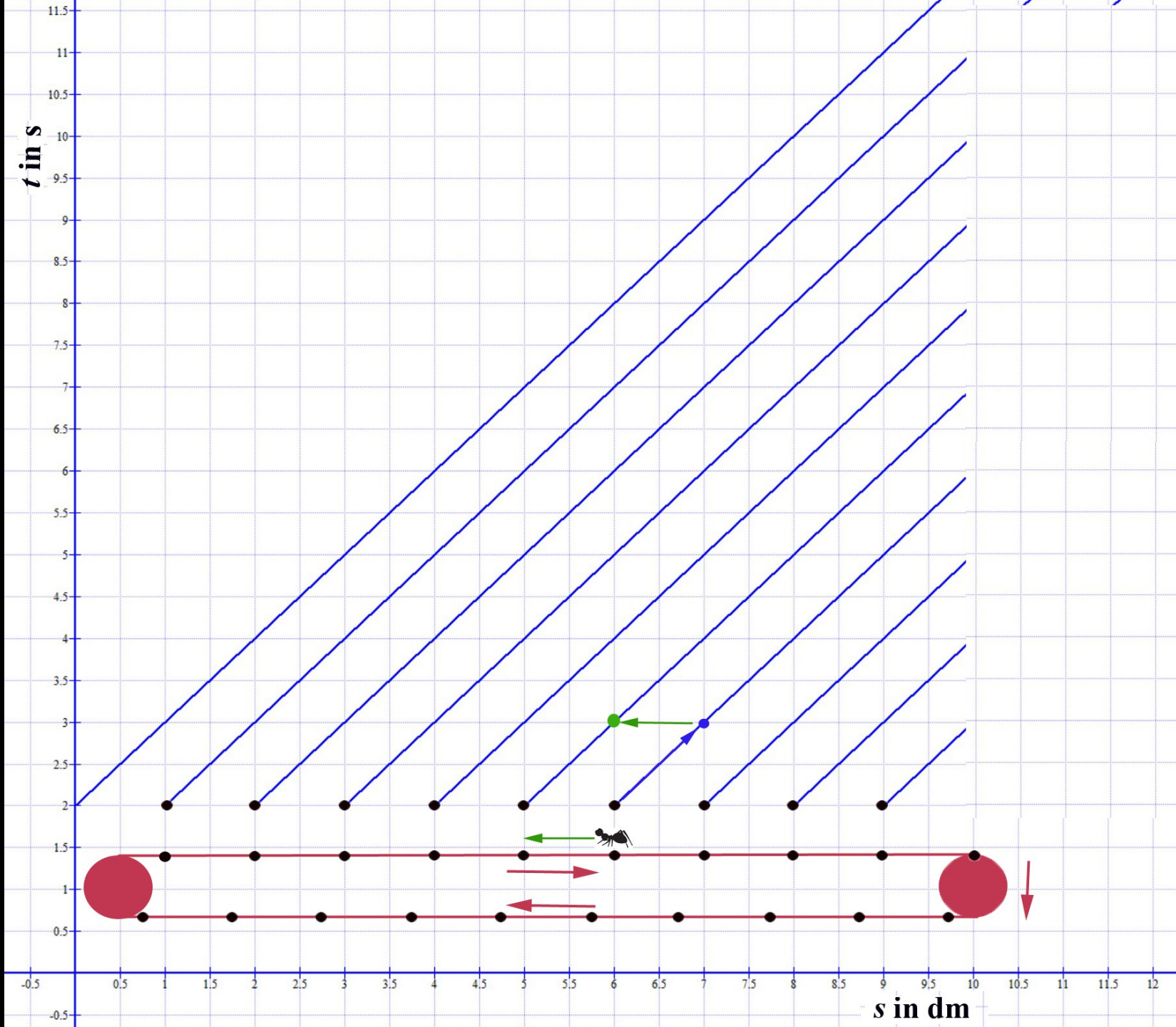


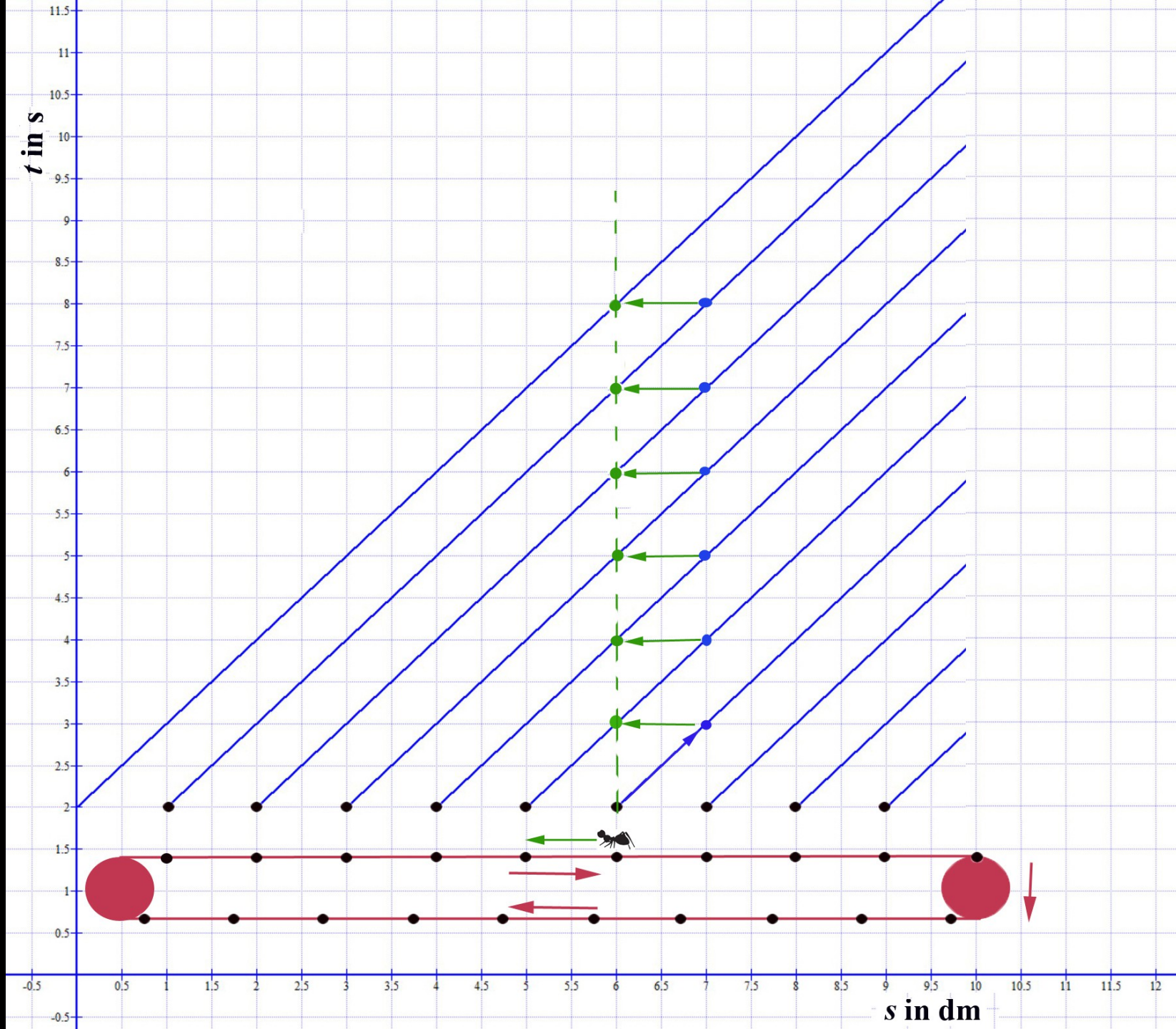
2. Ameise auf einem Förderband





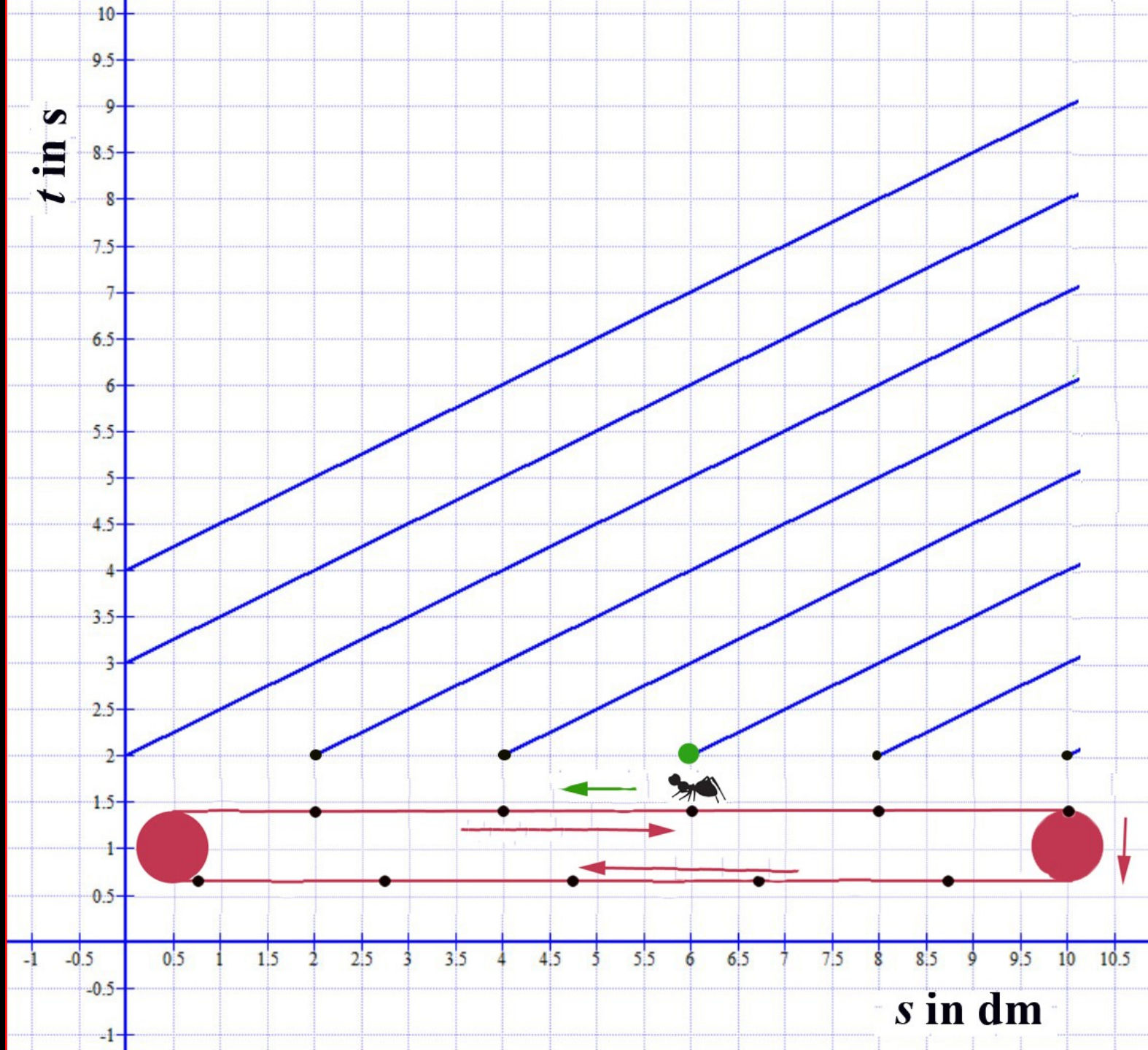


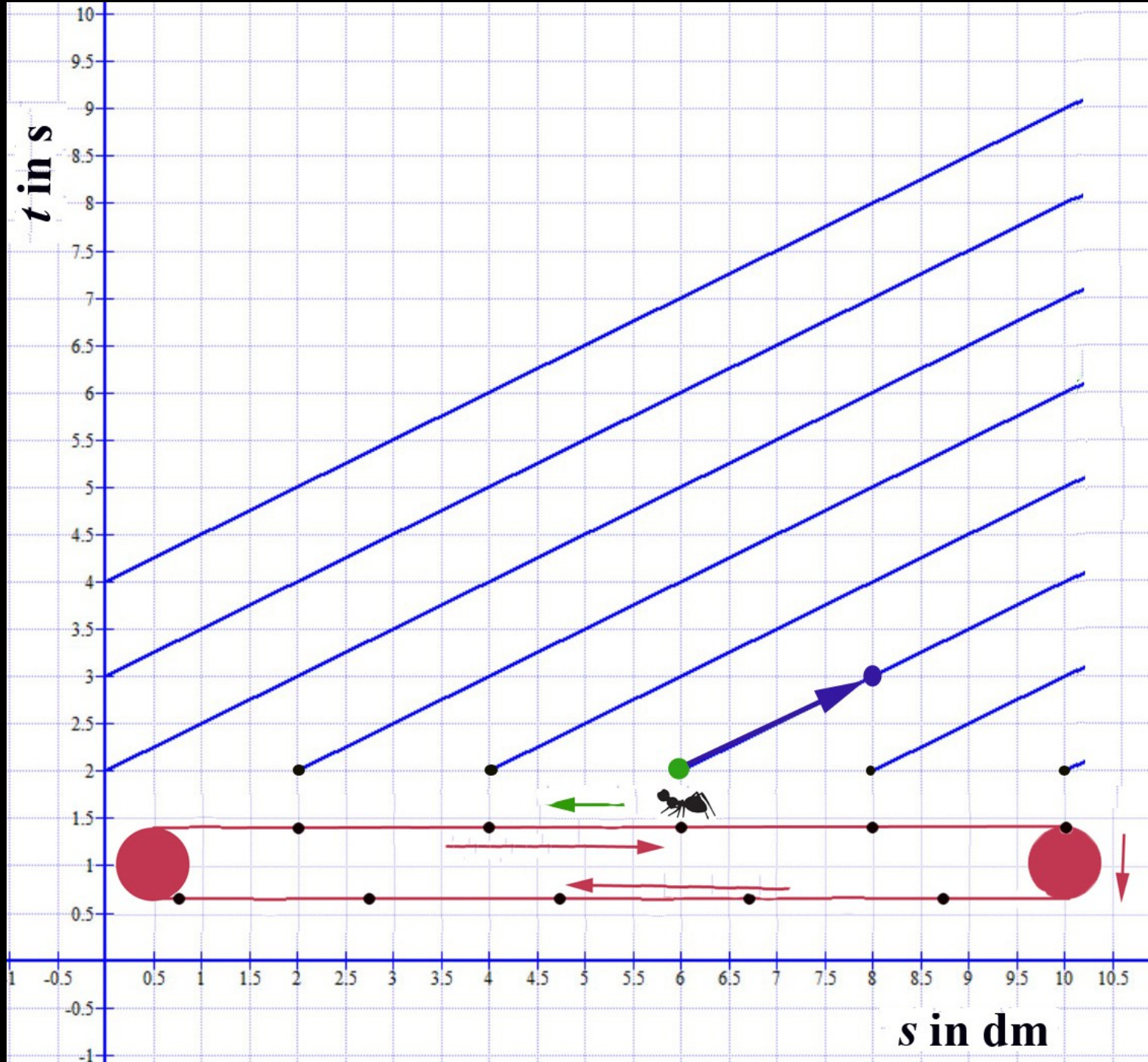


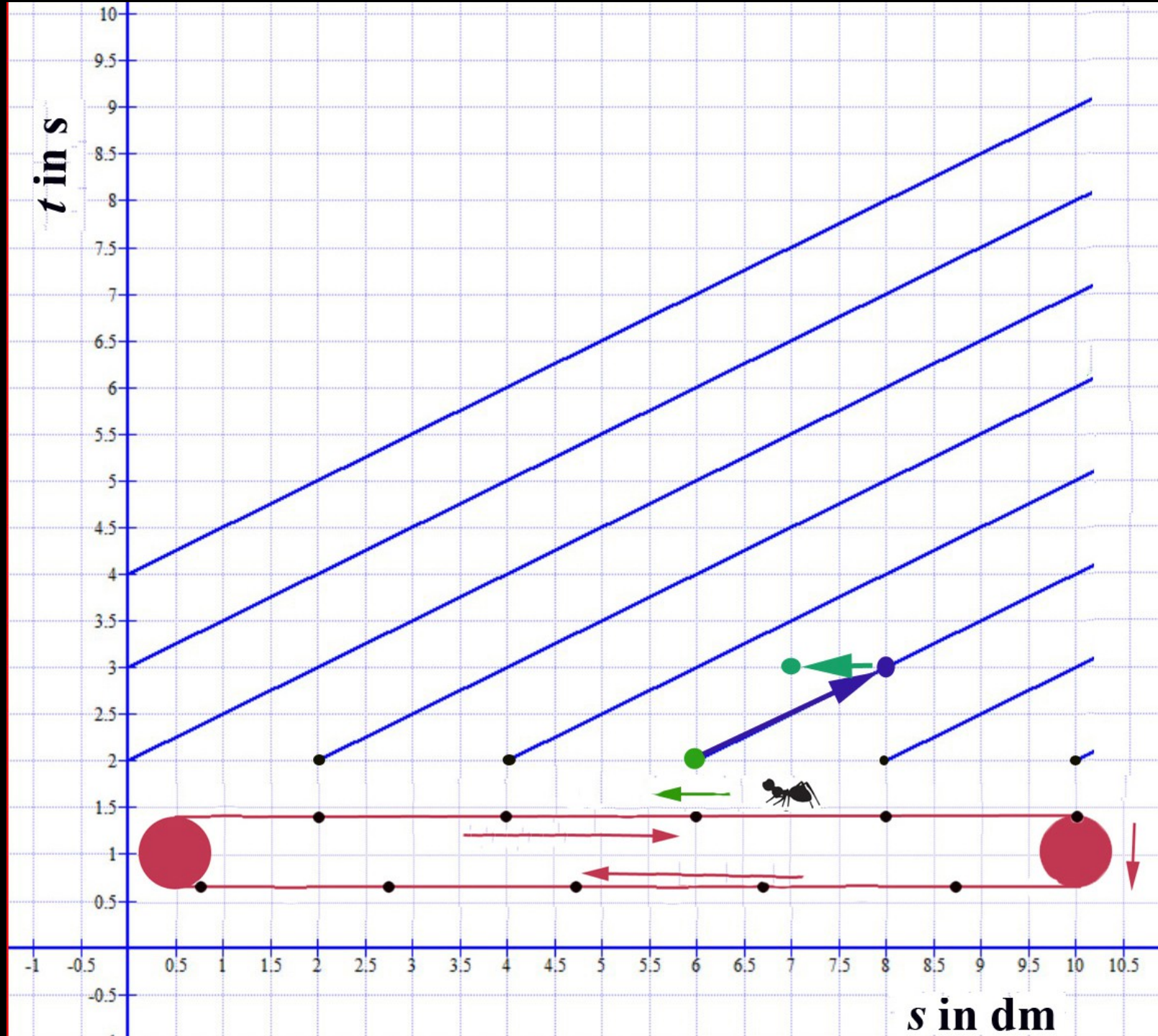


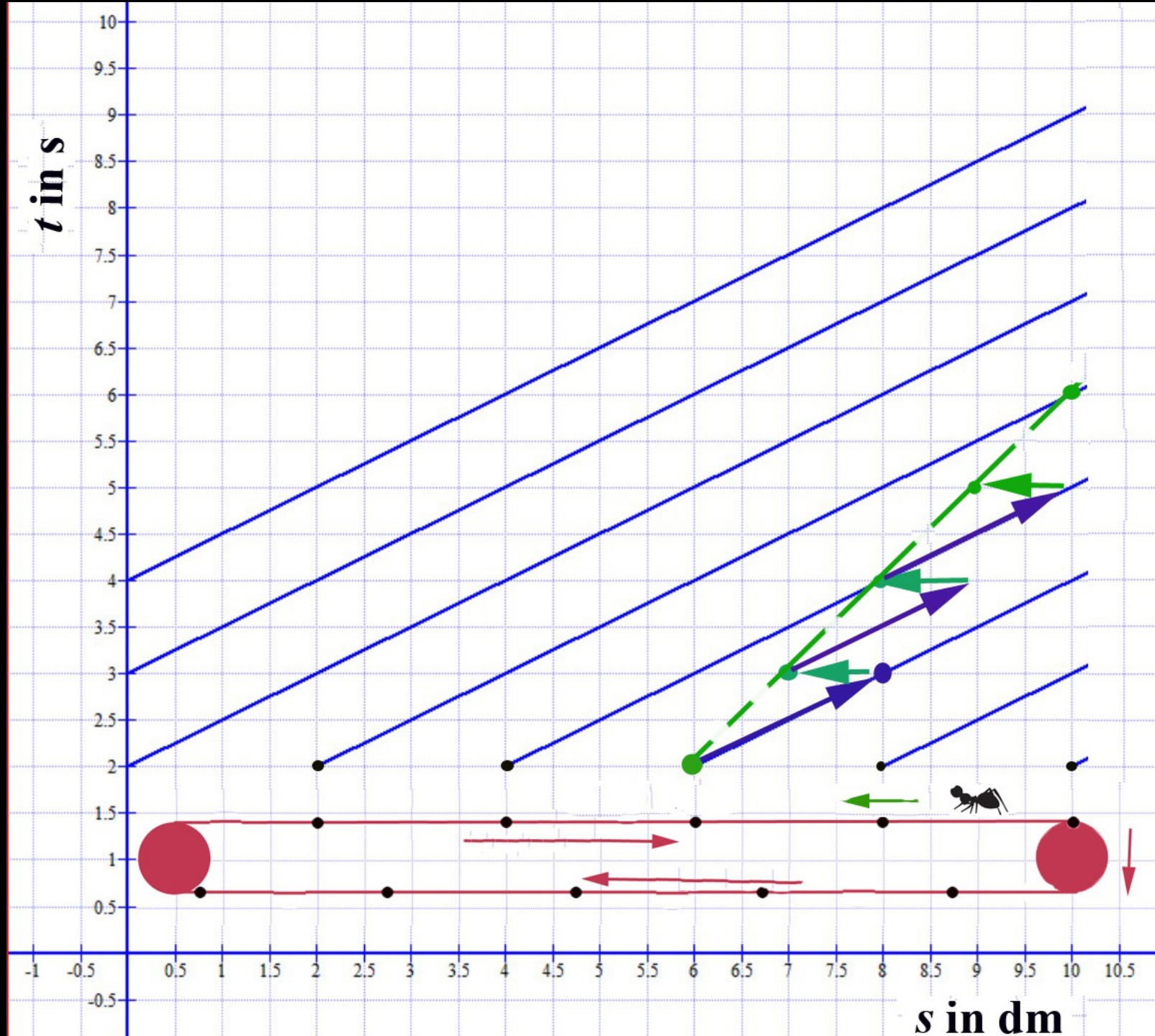
Schnelles Förderband





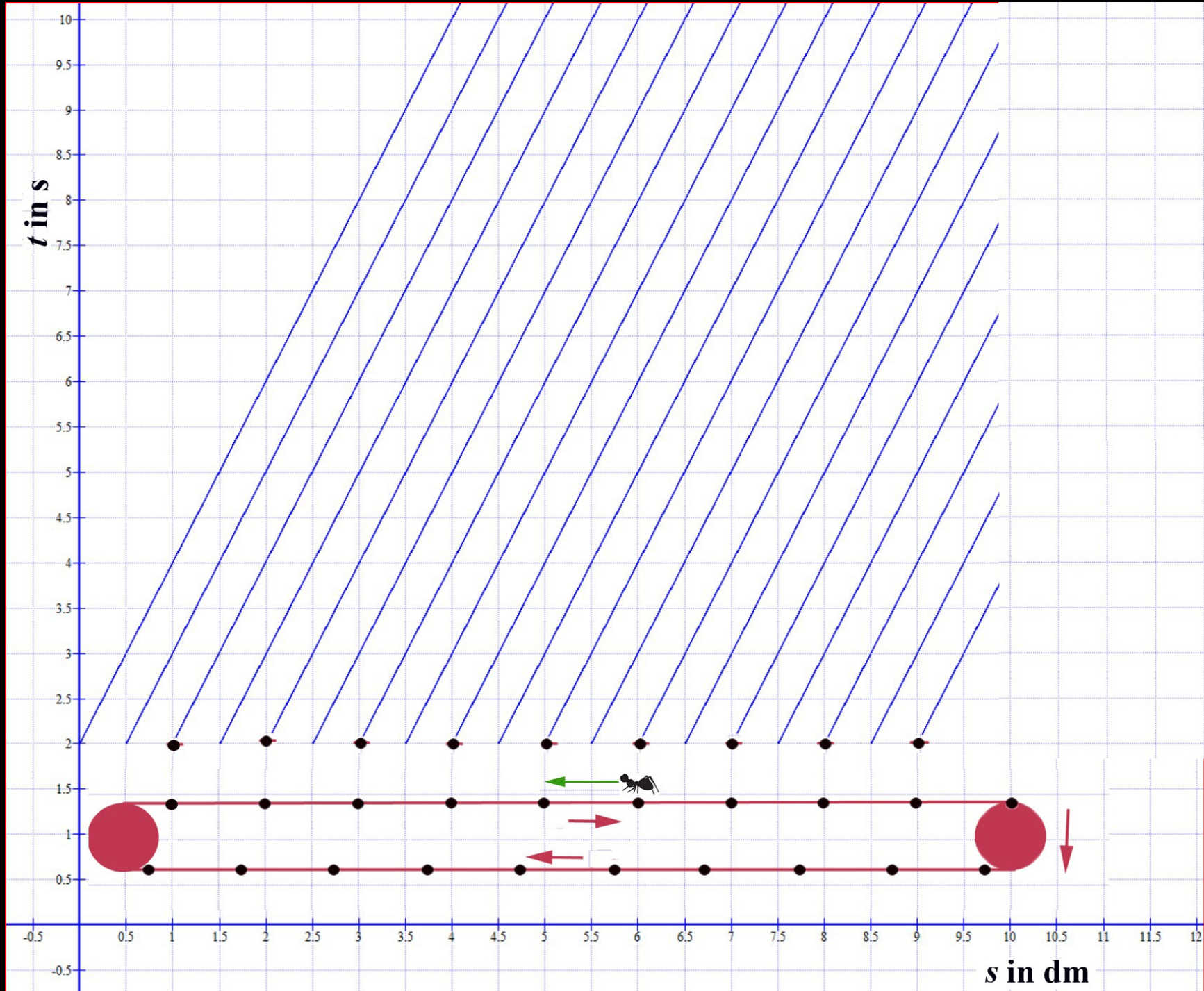


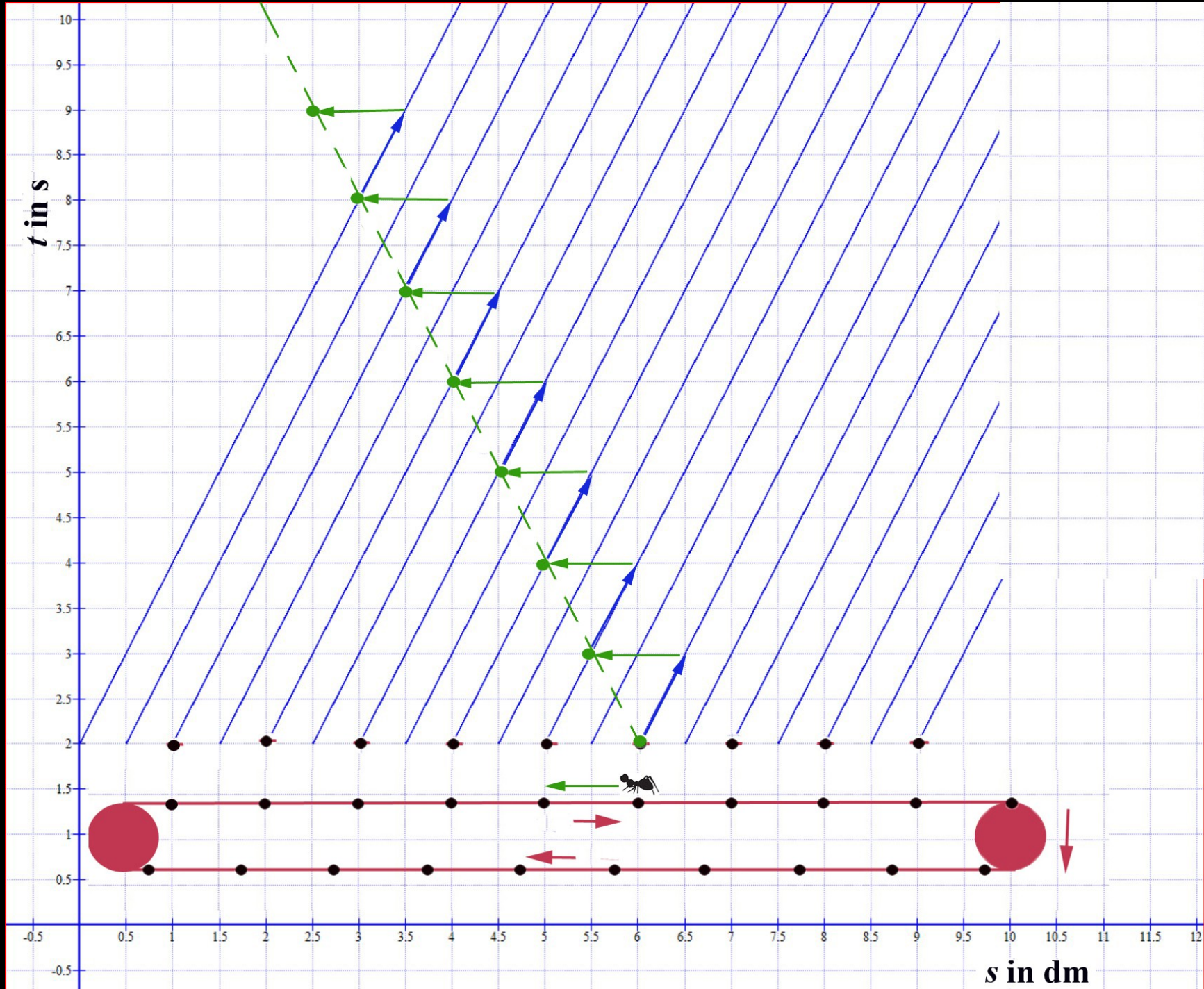




Langsames Förderband

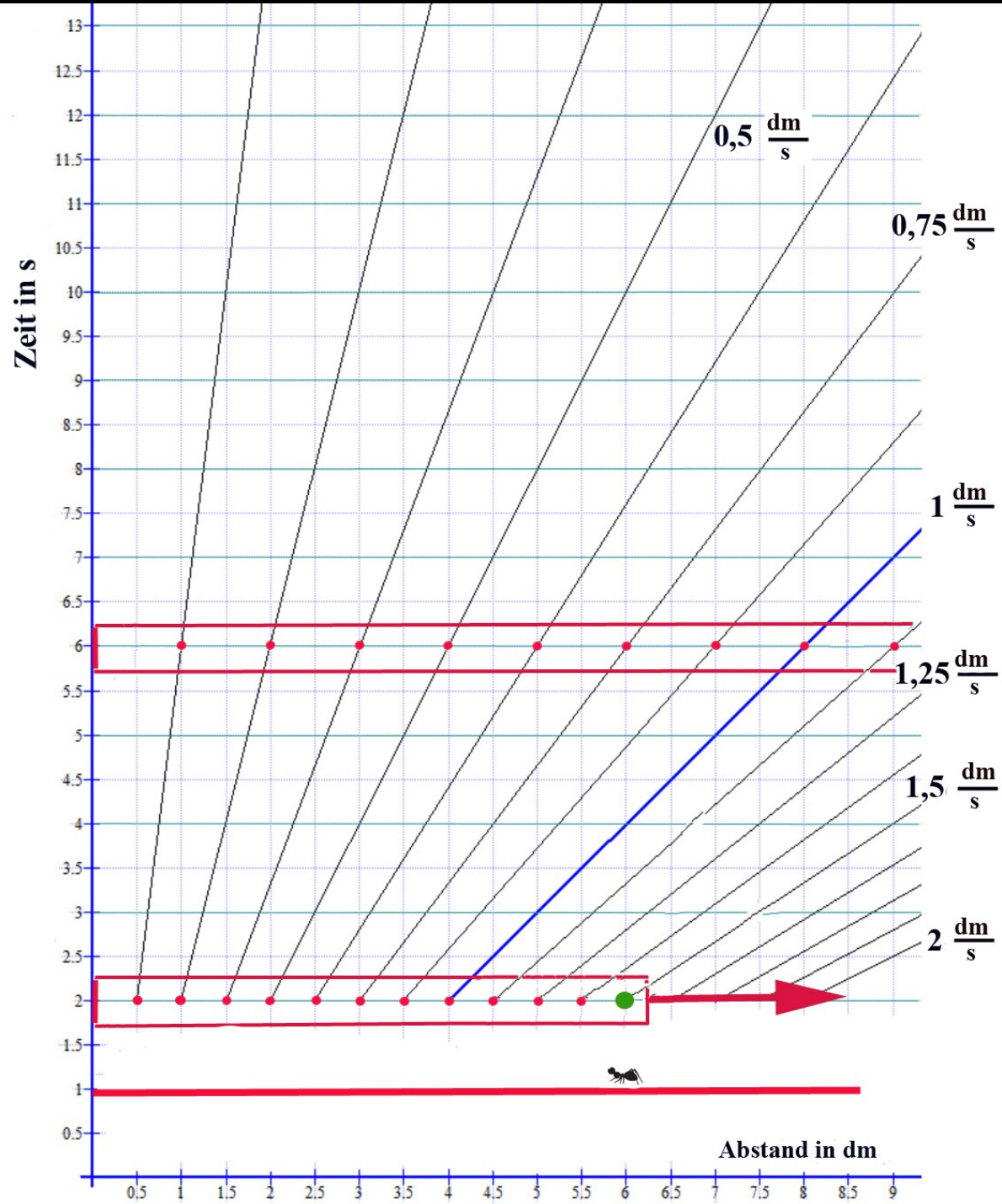


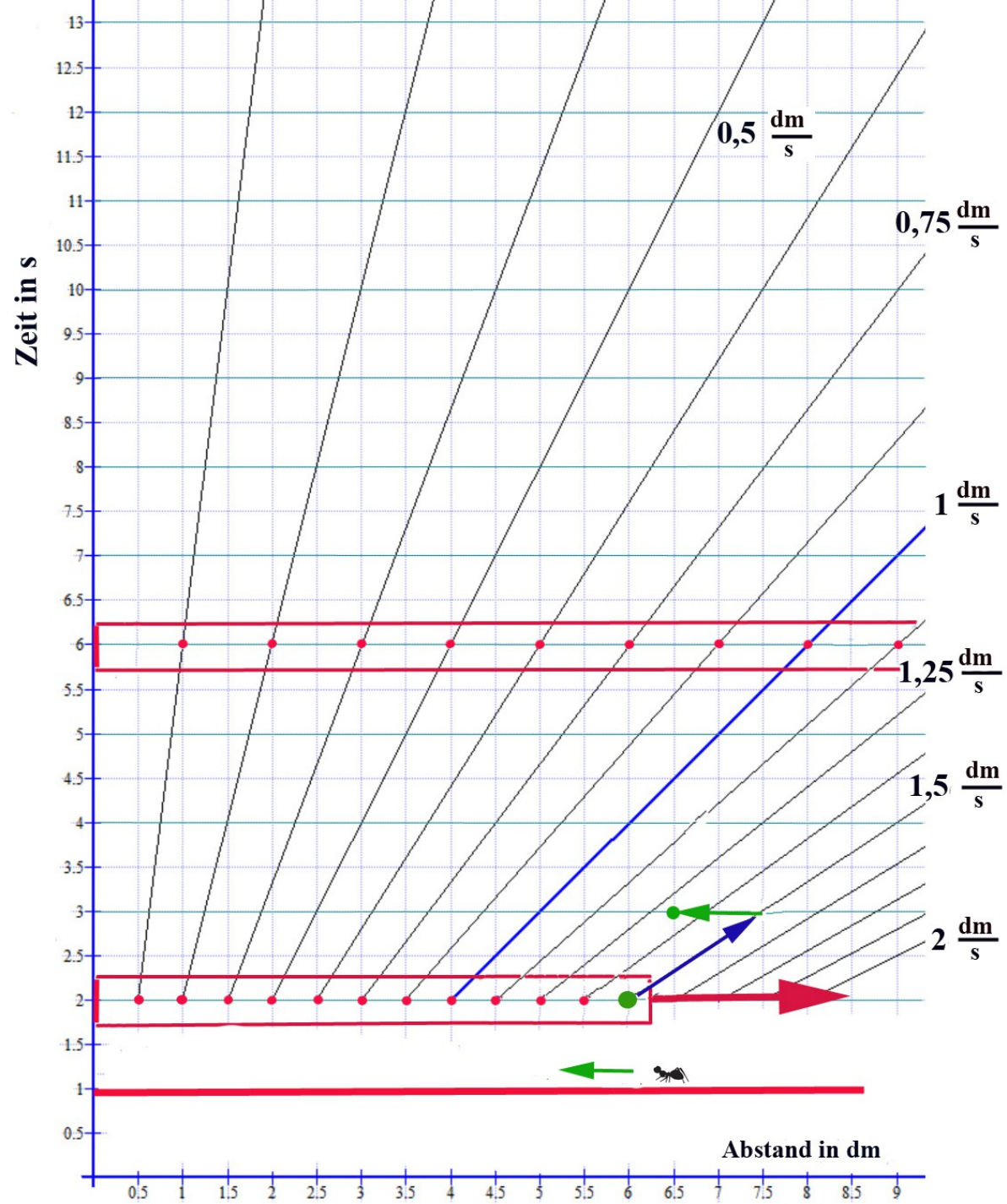


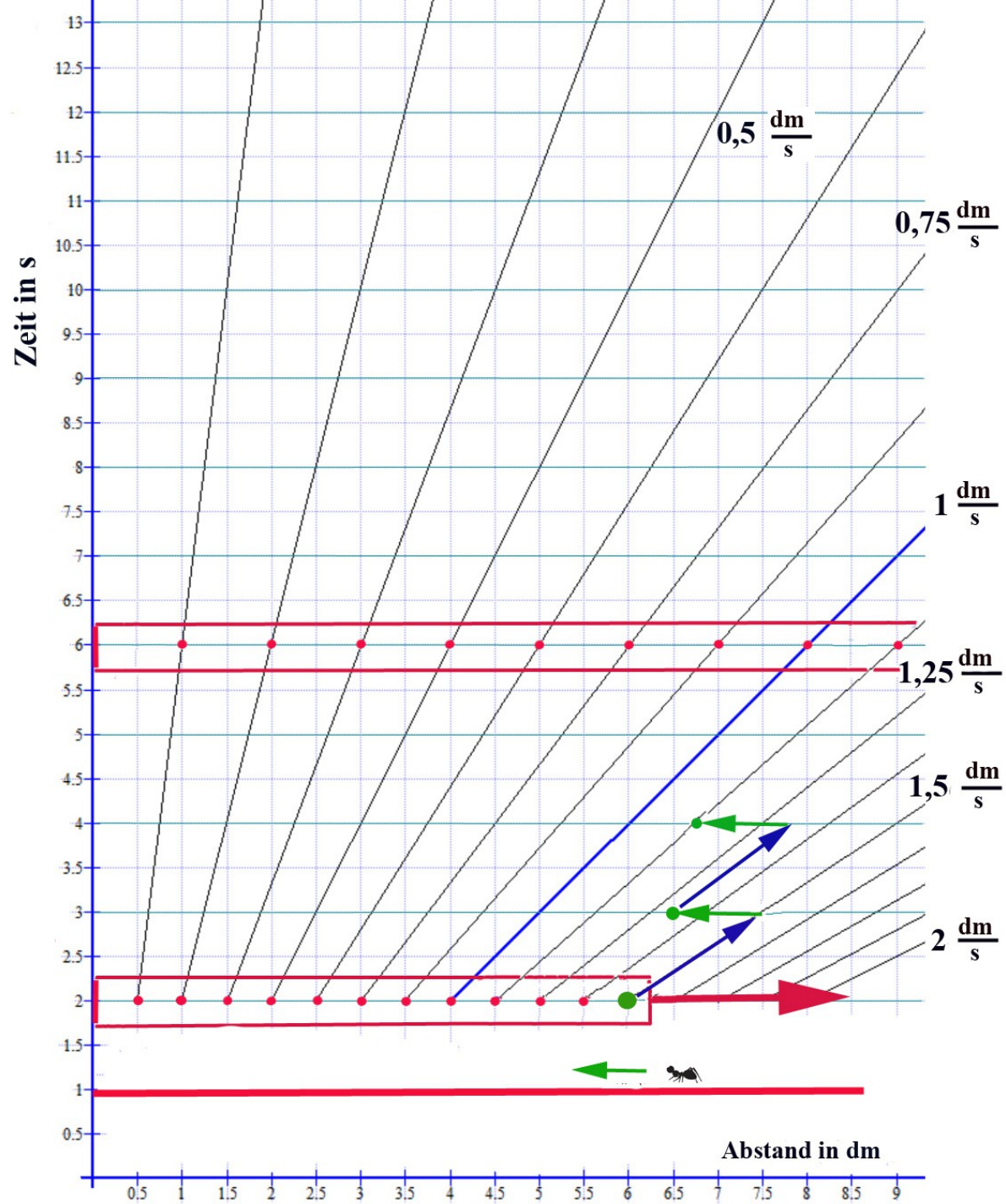


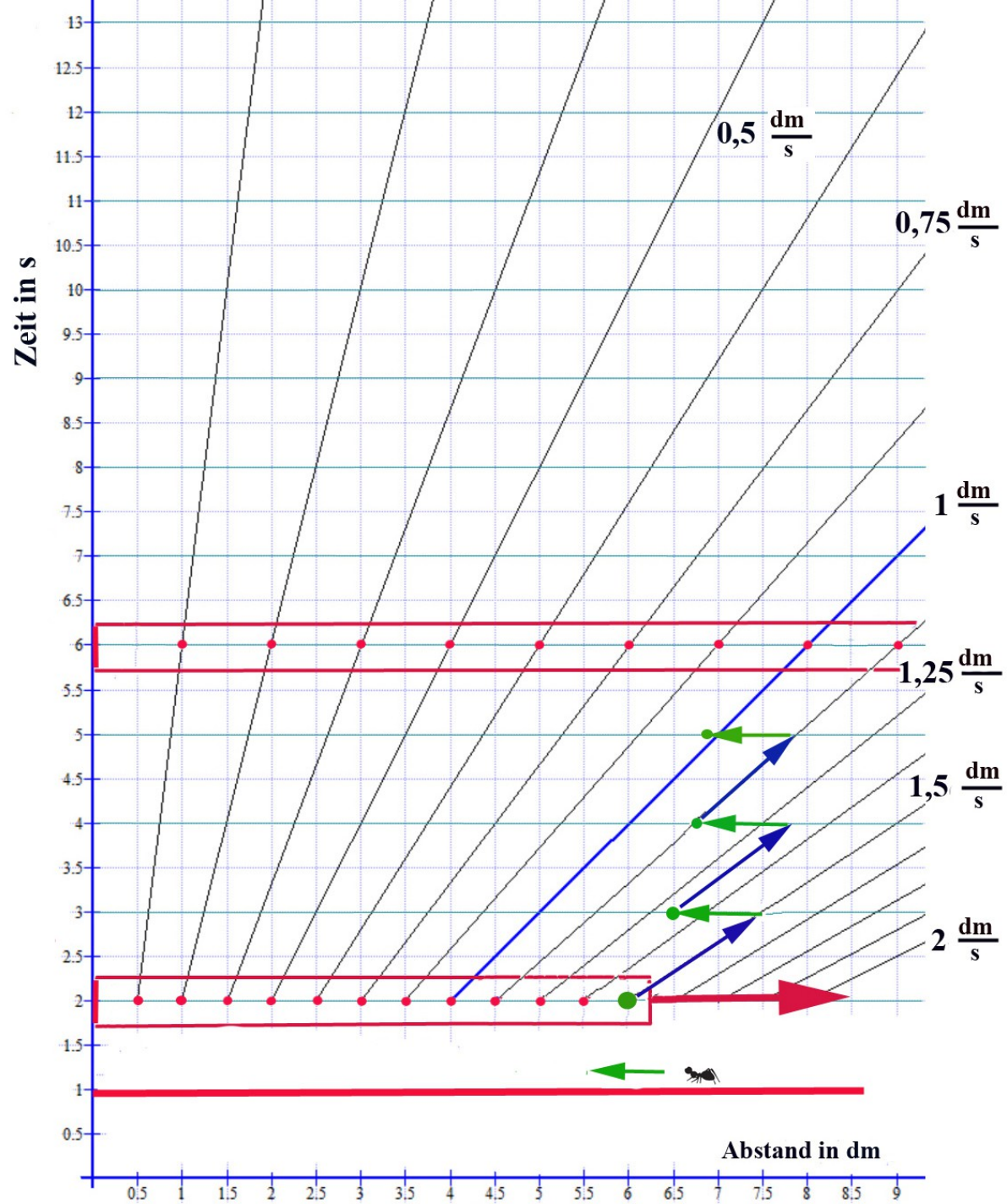
3. Ameise auf einem Gummiband

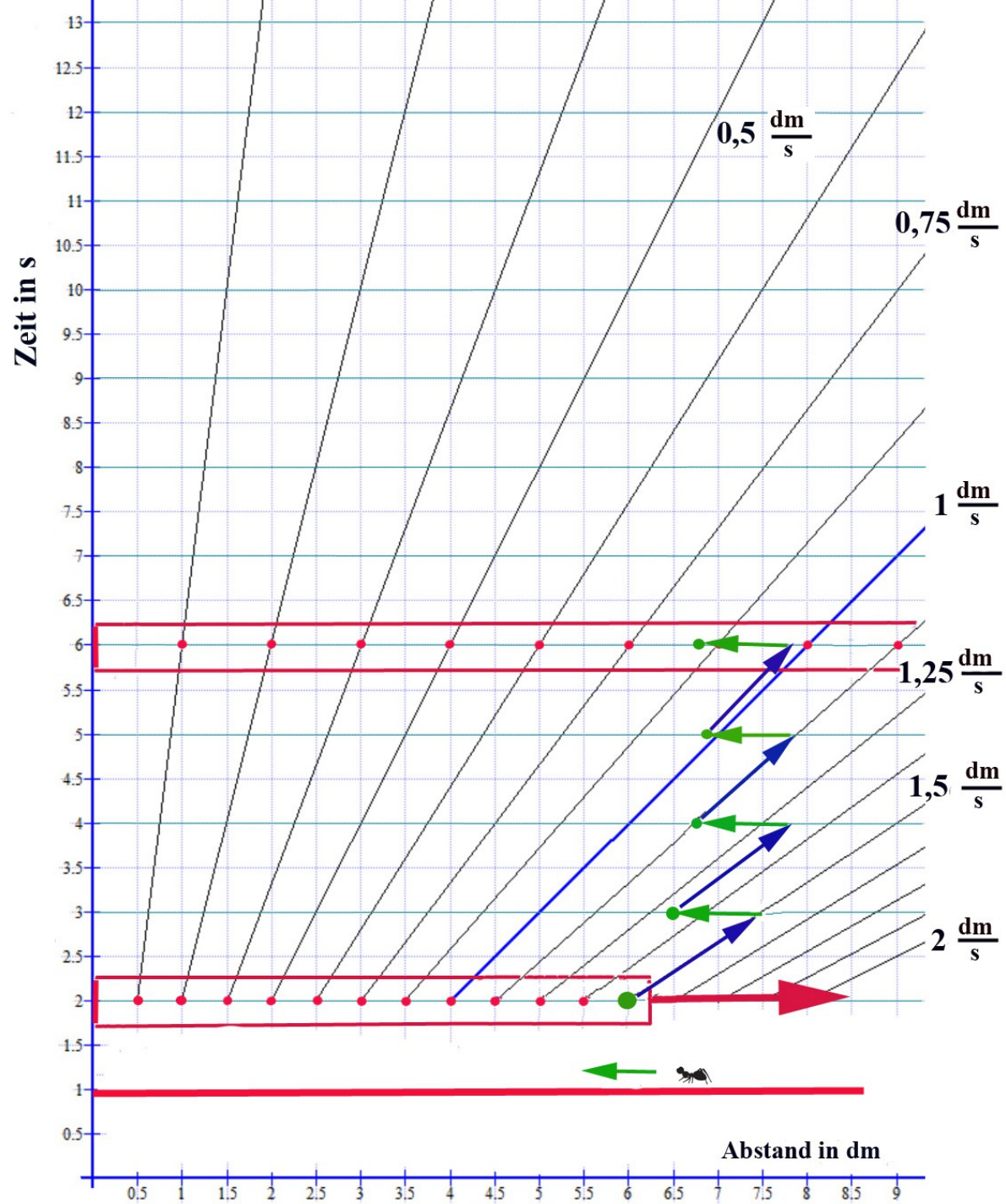


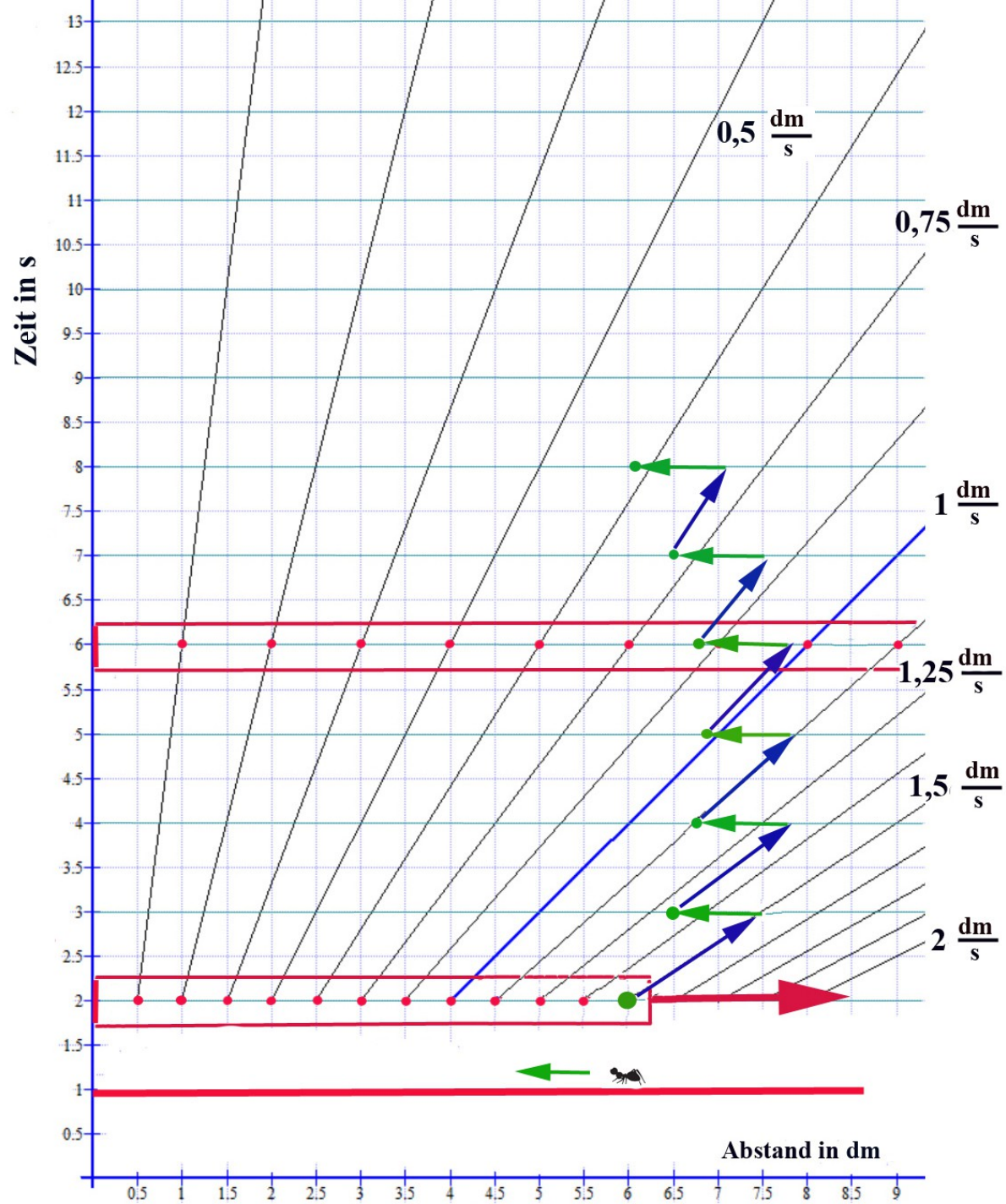


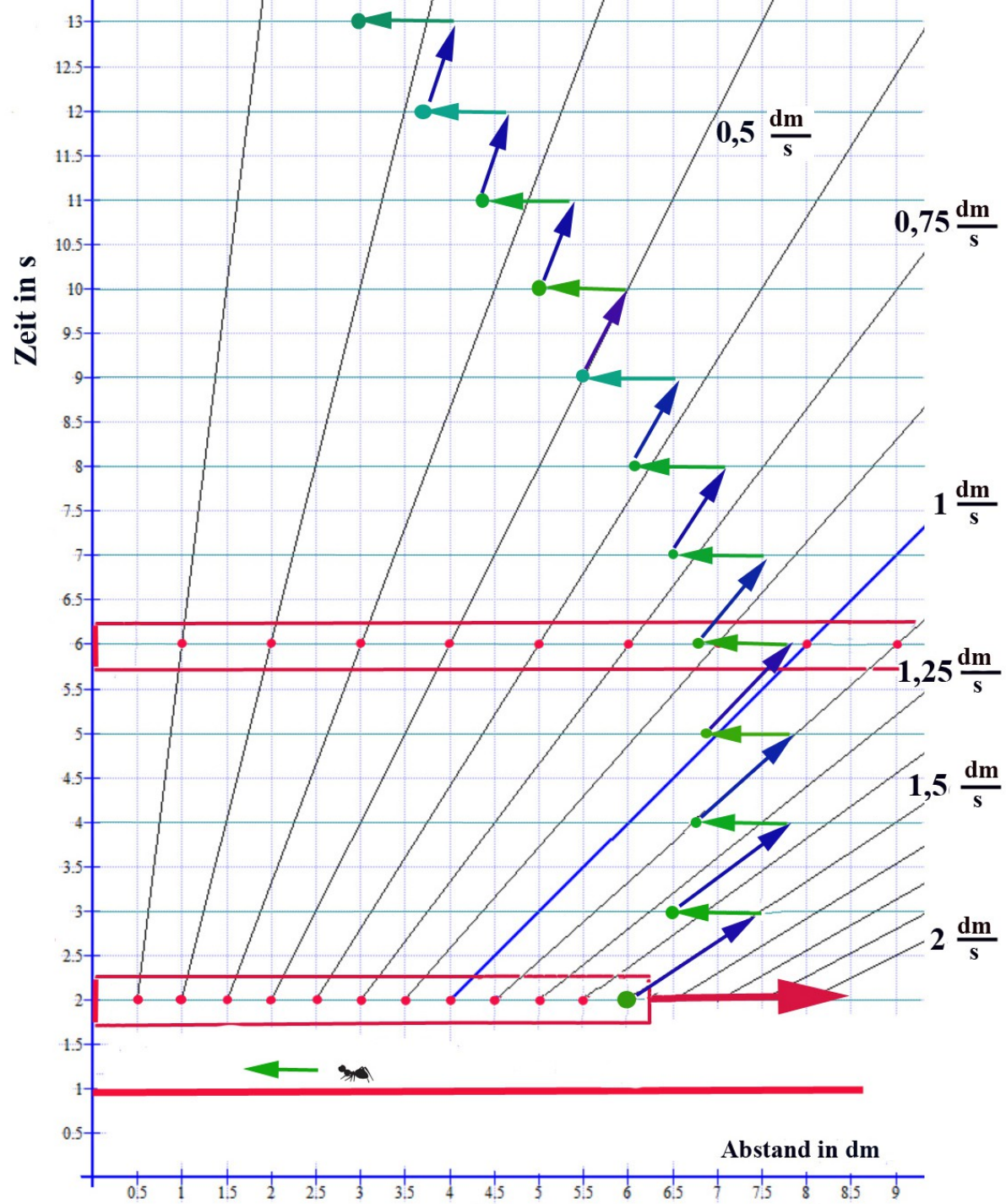












Ameise startete immer vom Ameisenhaufen

Ameisenhaufen =



=



Ameise

=

**Lichtteilchen
(Photon)**

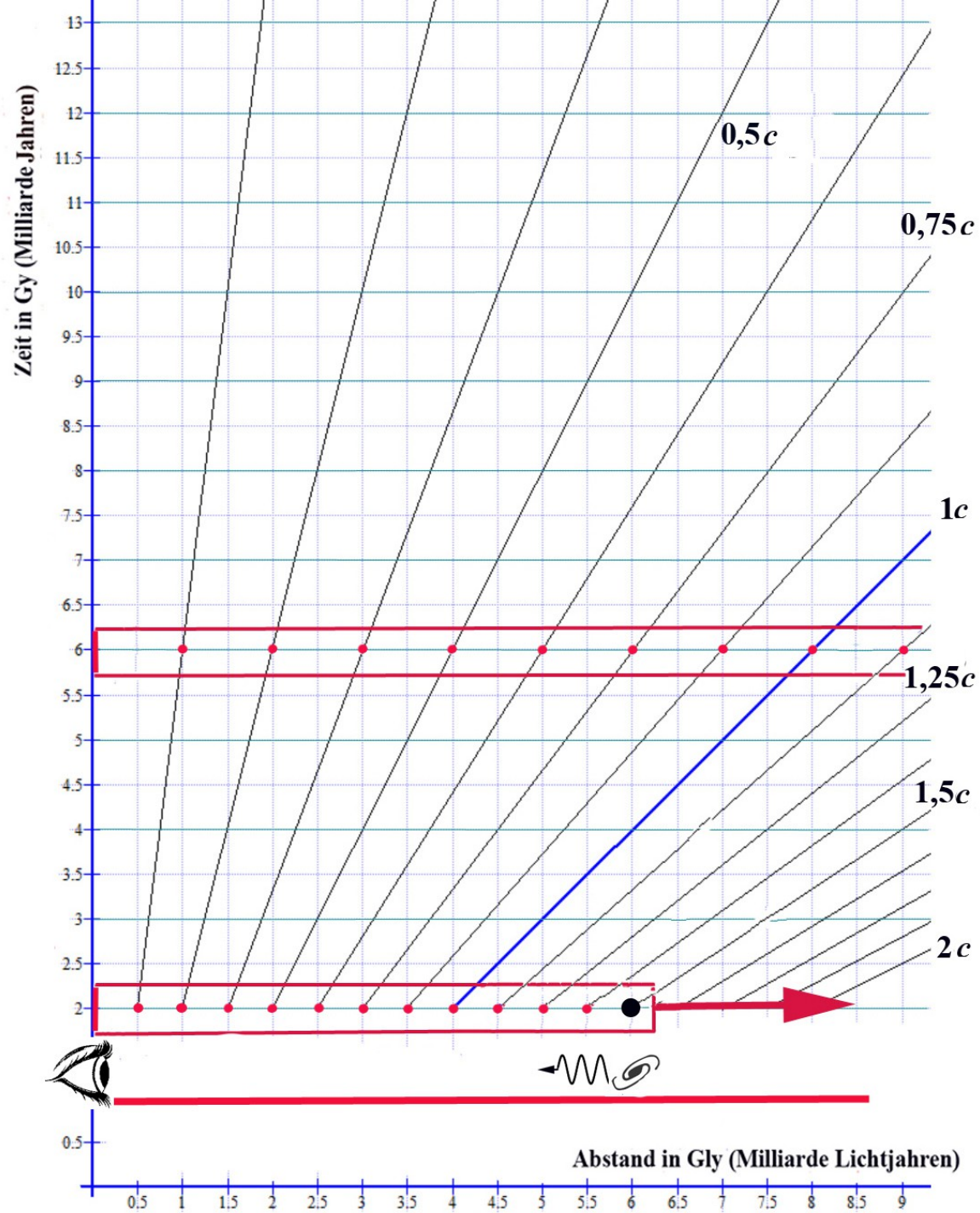
Längenmaßstab d (für s):

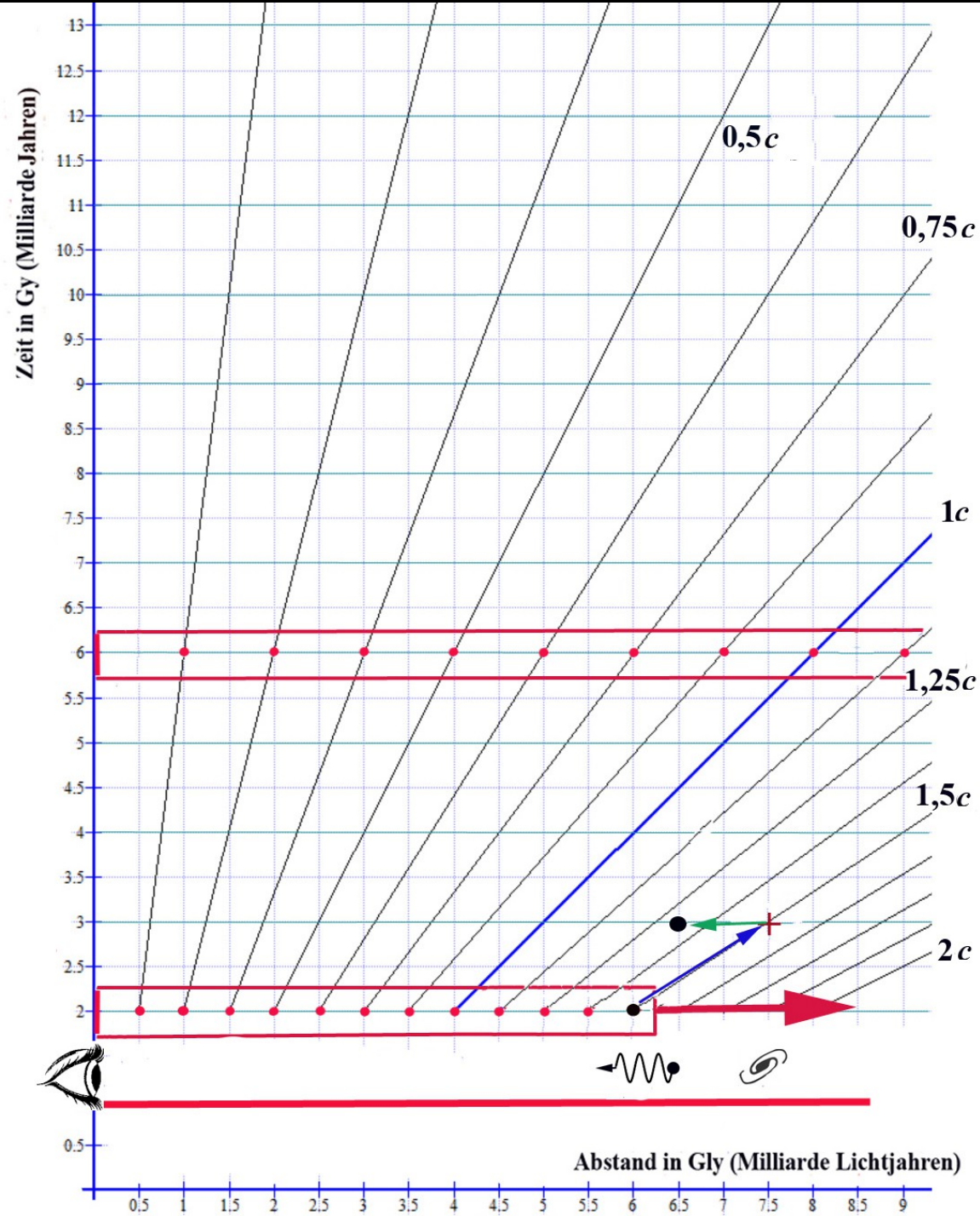
1 dm wird ersetzt durch 1 Milliarde Lichtjahre

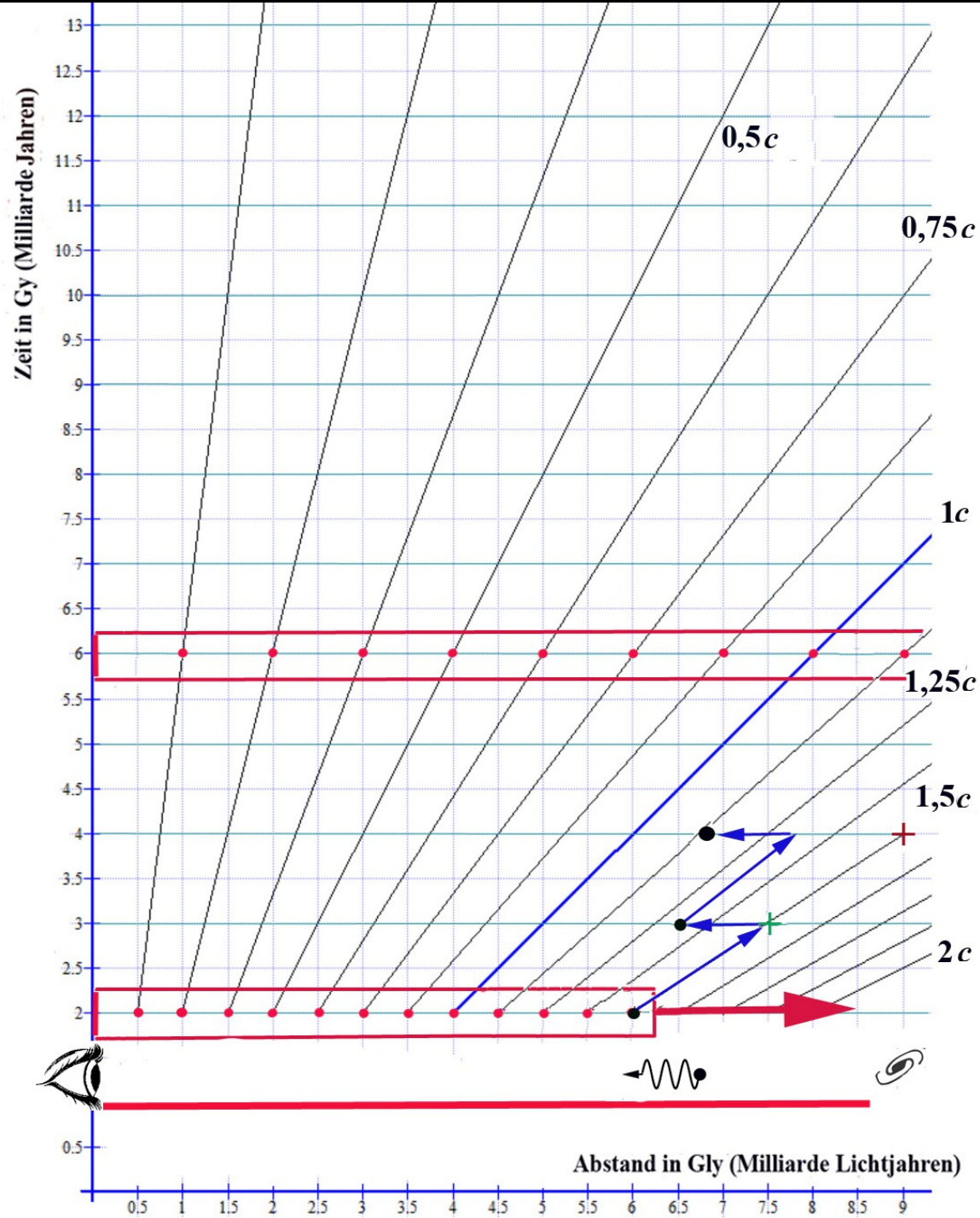
Zeitmaßstab t :

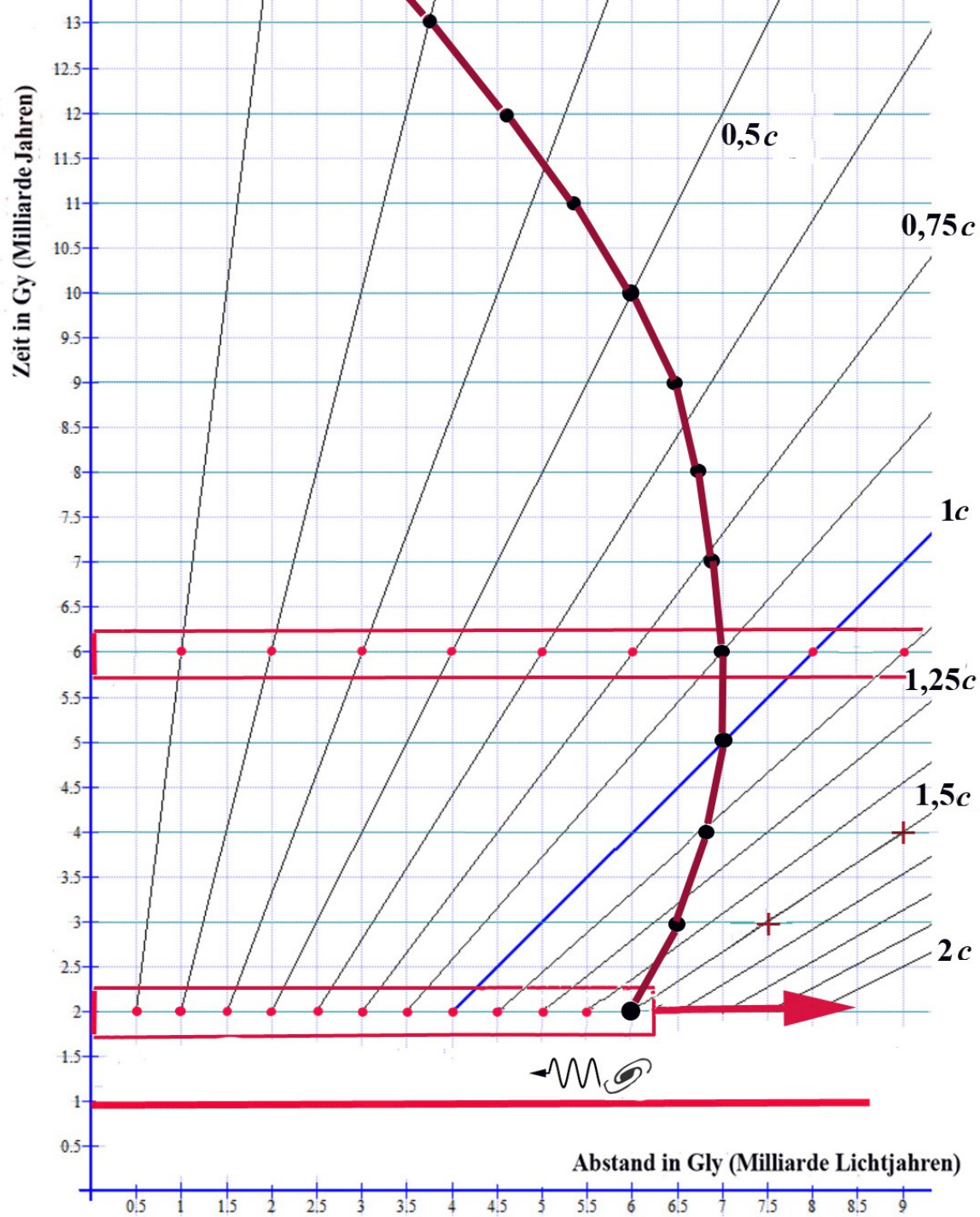
1 Sekunde wird ersetzt durch 1 Milliarde Jahre

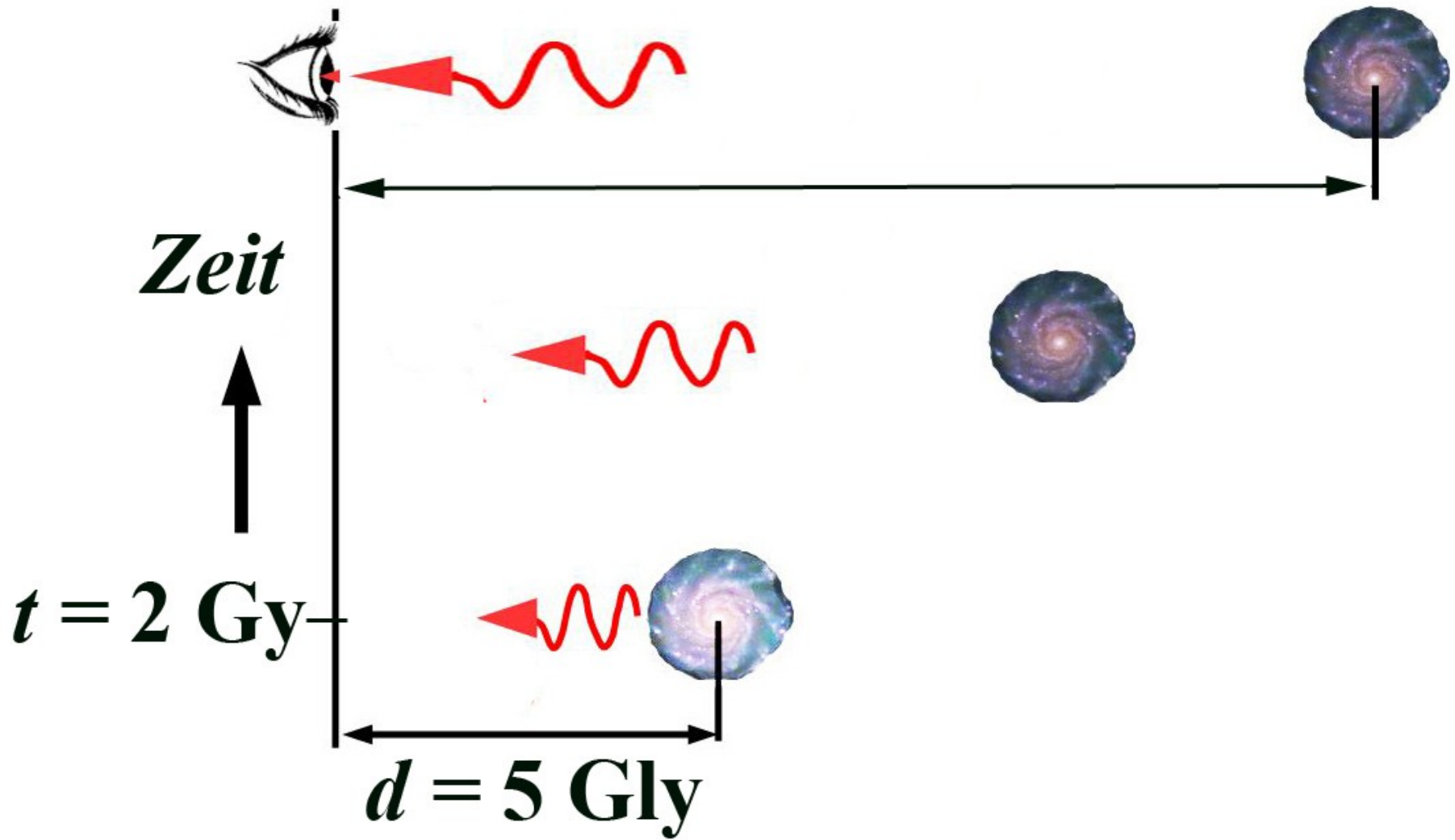
**Die Ausdehnung des Gummibandes
wird ersetzt durch die Ausdehnung
des Weltraumes**







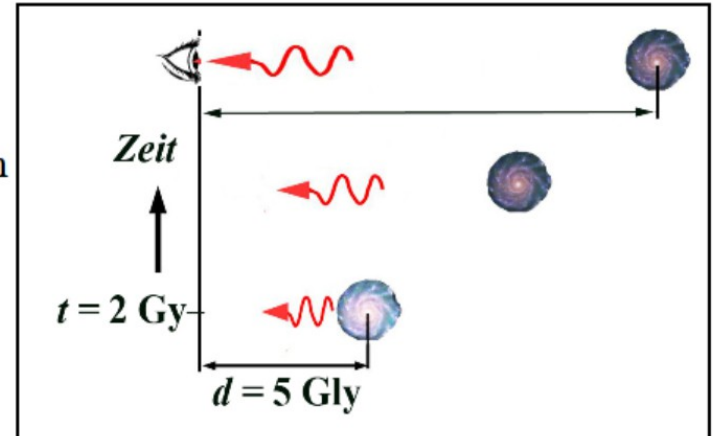




**Quasar leuchtet ab 2 Gy für 500 Millionen Jahre (0,5 Gy).
Wie lange (von .. bis) können wir ihn sehen?**

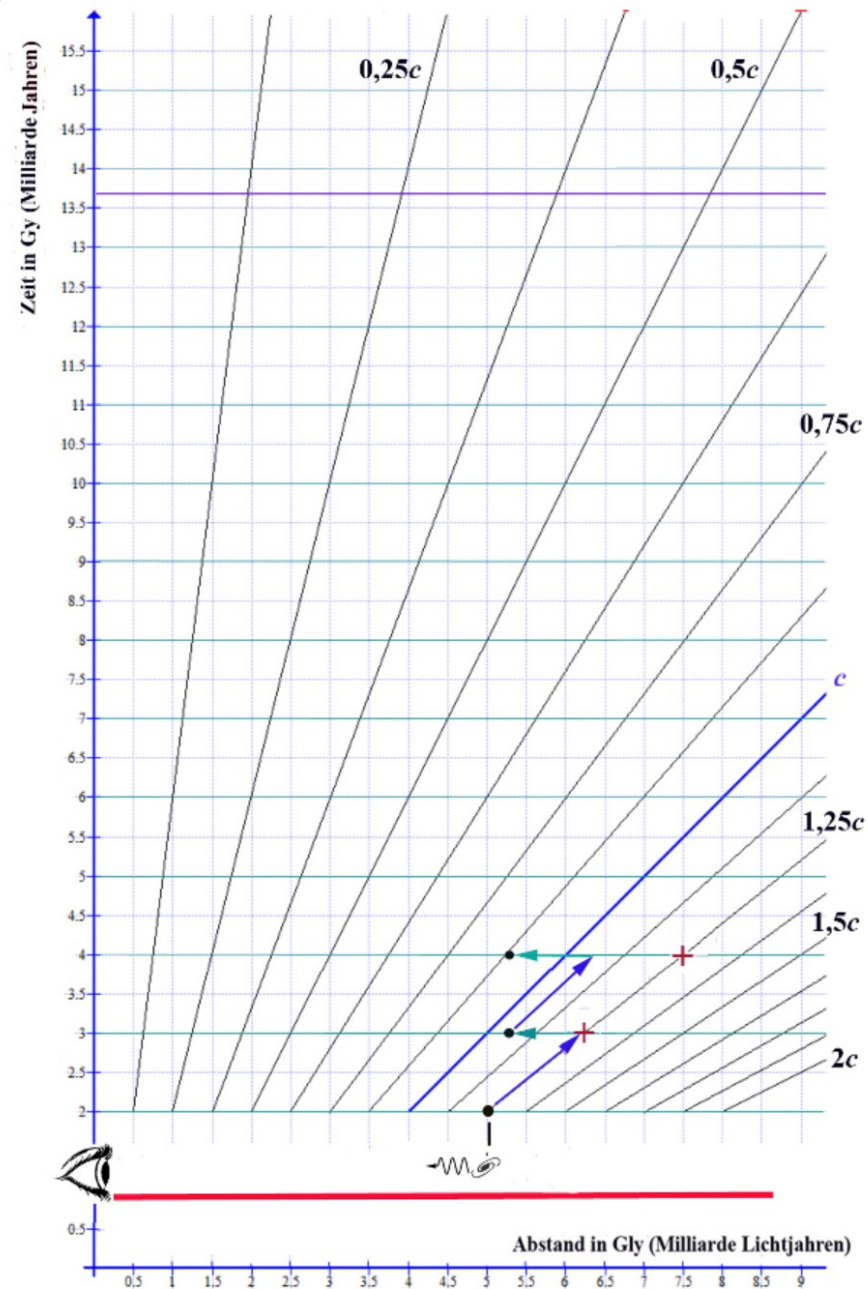
Ein Quasar begann vor 2 Milliarden Jahre nach dem Urknall für einen Zeitraum von 500 Millionen Jahren so zu strahlen, dass er noch nach ca. 13 Milliarden Jahren mit entsprechenden Teleskopen wahrgenommen werden könnte. Seine Entfernung betrug damals 5 Milliarden Lichtjahre.

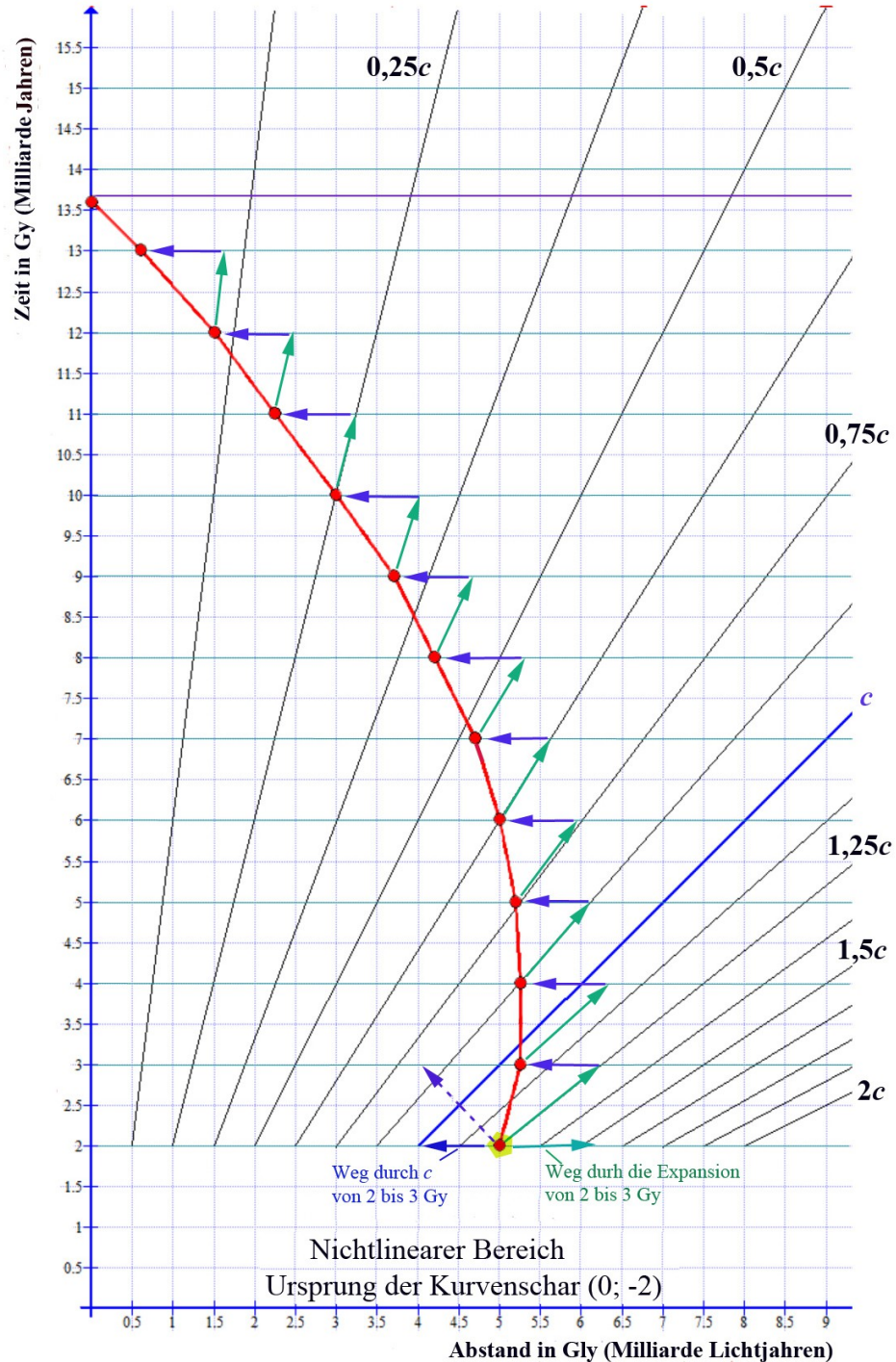
Aufgrund der Expansion des Universums entfernte er sich mit 1,25 fachen Lichtgeschwindigkeit von uns weg. Es soll untersucht werden, ob sein Licht uns jemals erreicht und in welchem Zeitraum das dann wäre.



Gehen Sie dabei wie folgt vor:

1. Erstellen Sie mit Hilfe der Seite 2 den Lichtweg für die Aussendung des Lichtes des Quasars zum Zeitpunkt 2 Gy im Raum-Zeit-Diagramm. Verwenden Sie folgendes Näherungsverfahren, dass jedoch zuverlässige Werte liefert. Dabei wird jeweils für einen Zeitraum von einem Gigajahr zunächst der Weg des Lichtes durch die Expansion ermittelt und mit Hilfe der Kurvenschar eingetragen (blauer Pfeil) und anschließend der Weg des Lichtes aufgrund der Lichtgeschwindigkeit hinzugefügt (grüner Pfeil).
2. Nach wie vielen Jahren (ca.) nach dem Urknall wäre eine Beobachtung möglich?





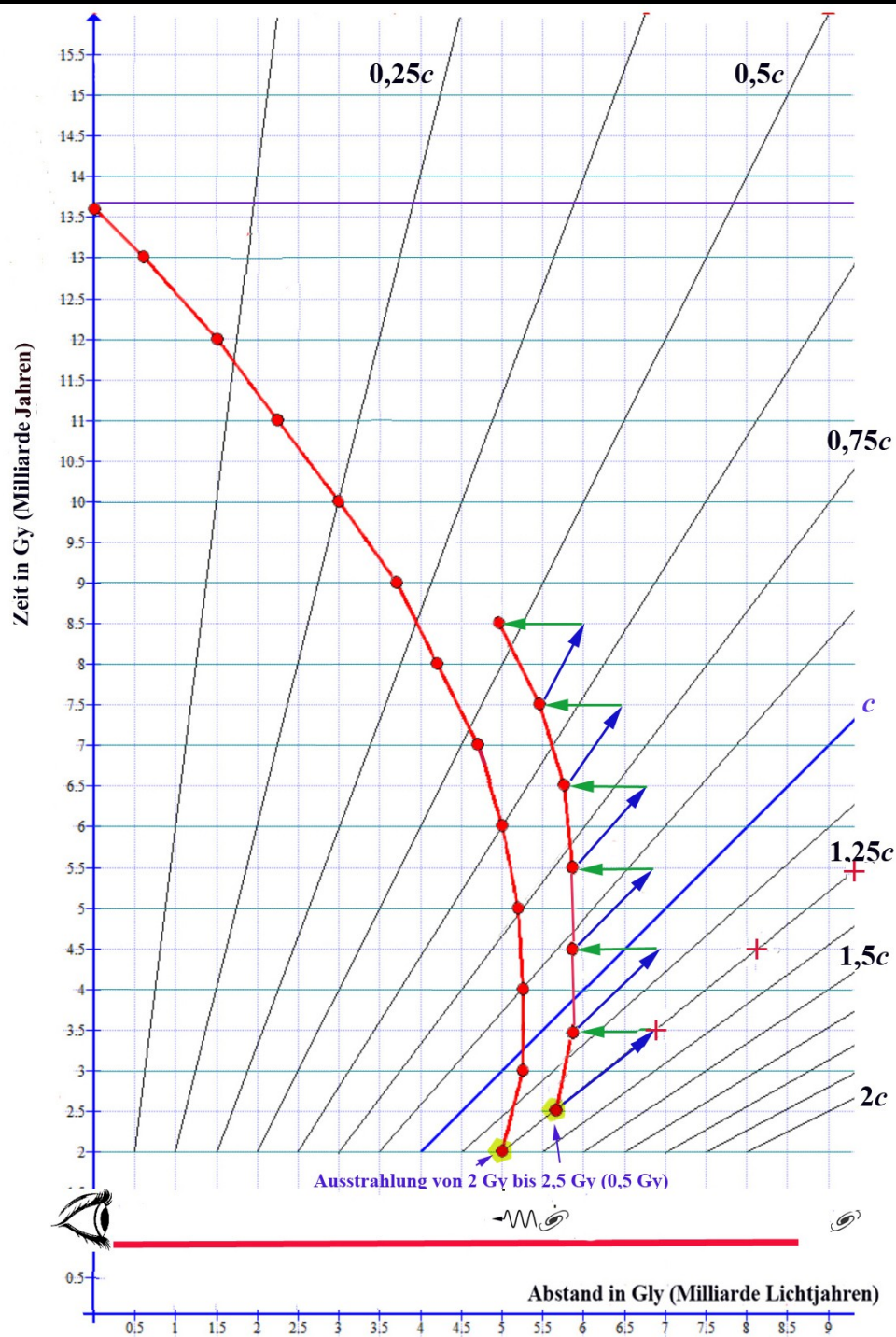
Nach ca. 13,6 Gy kann der Quasar bei uns beobachtet werden, er müsste demnach heute mit entsprechenden Teleskopen wahrgenommen werden können.

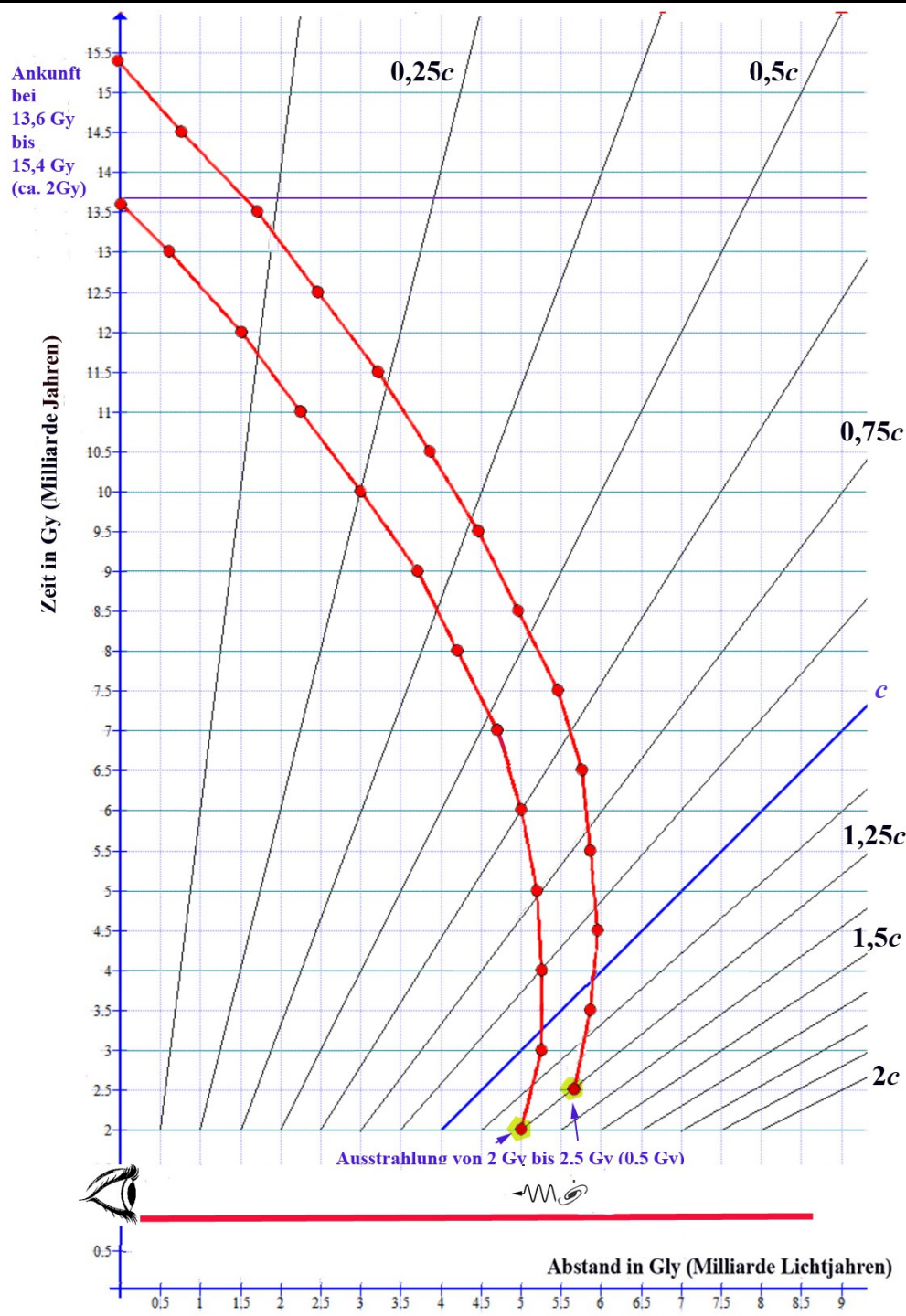
3. 500 Millionen Jahre nach dieser ersten Ausstrahlung, also 2,5 Gy nach dem Urknall vermindert sich seine Helligkeit extrem, sodass er für uns nicht mehr sichtbar wäre.

Ergänzen Sie dazu auf Seite 3 das Raum – Zeit – Diagramm und ermittel Sie den Zeitpunkt, ab dem der Quasar nicht mehr wahrgenommen werden kann.

4. In welchem Zeitintervall konnte der Quasar bei uns beobachtet werden? Vergleichen sie diesen Wert mit dem Zeitintervall der Aussendung von 500 Millionen Jahren.

5. Welche Auswirkung hat das Ergebnis der Aufg. 4 auf die Lichtstärke des eintreffenden Lichtes? *(Gehen Sie dabei von der Teilchenstruktur des Lichtes aus und berücksichtigen Sie dabei, dass die Anzahl der ausgehenden Photonen gleich der Anzahl der eintreffenden sein muss)*





Der Quasar kann bei uns von 13,6 Gy bis 15,4 Gy wahrgenommen werden, also ca. 2 Gy.

Die Zeitdauer hat sich um den Faktor 4 vergrößert.

Durch die Expansion vergrößern sich Zeitintervalle. Das ist keine Zeitdehnung, sondern auf längere Lichtwege durch die Raumausdehnung zurückzuführen.

3. 500 Millionen Jahre nach dieser ersten Ausstrahlung, also 2,5 Gy nach dem Urknall vermindert sich seine Helligkeit extrem, sodass er für uns nicht mehr sichtbar wäre.

Ergänzen Sie dazu auf Seite 3 das Raum – Zeit – Diagramm und ermittel Sie den Zeitpunkt, ab dem der Quasar nicht mehr wahrgenommen werden kann.

Nach 15,4 Gy ist er nicht mehr wahrnehmbar

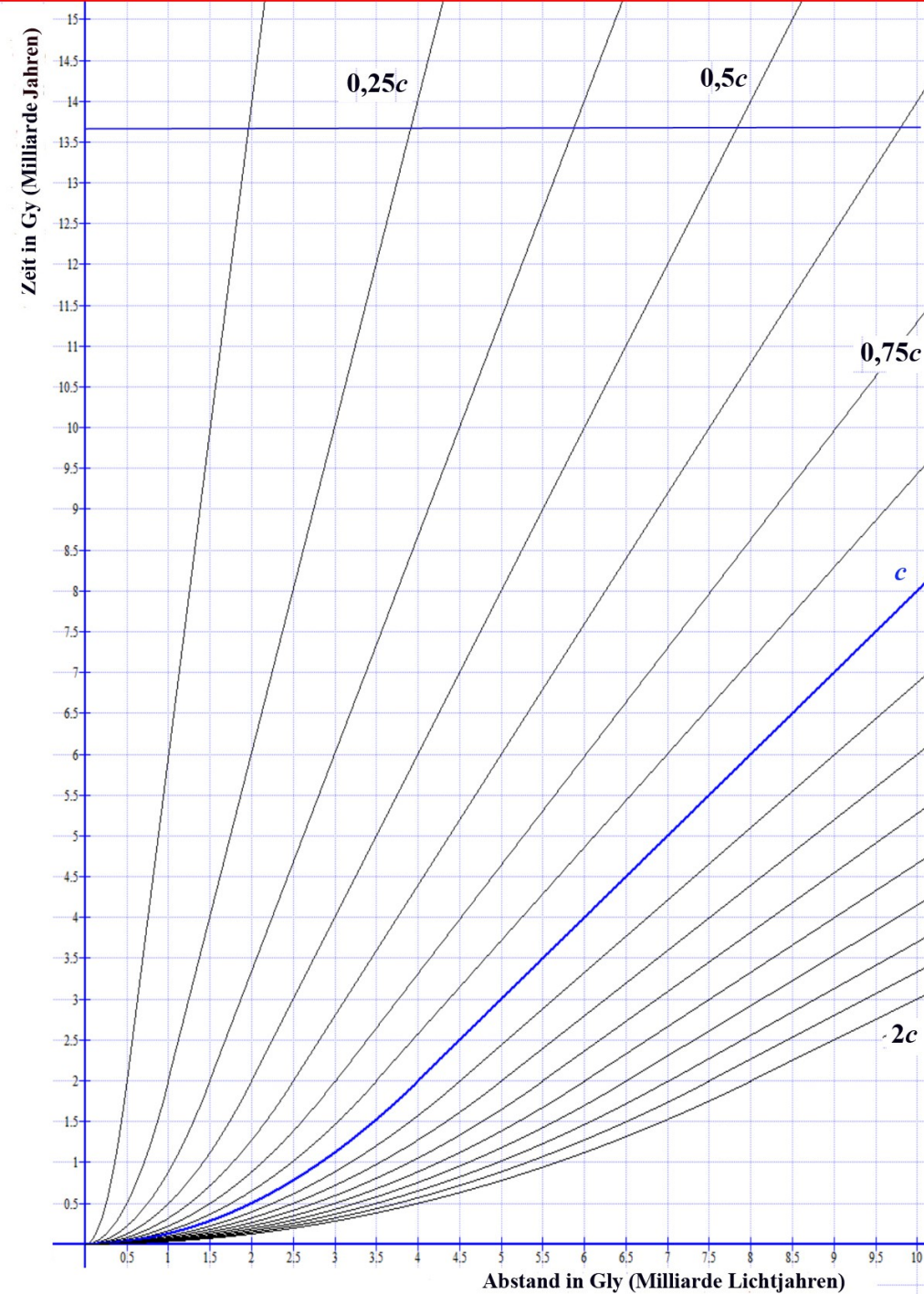
4. In welchem Zeitintervall konnte der Quasar bei uns beobachtet werden? Vergleichen sie diesen Wert mit dem Zeitintervall der Aussendung von 500 Millionen Jahren.

$$15,4 \text{ Gy} - 13,6 \text{ Gy} = 1,8 \text{ Gy} = \text{ca. } 2 \text{ Gy} \quad \text{Vergleich: } 2 \text{ Gy} / 0,5 \text{ Gy} = 4$$

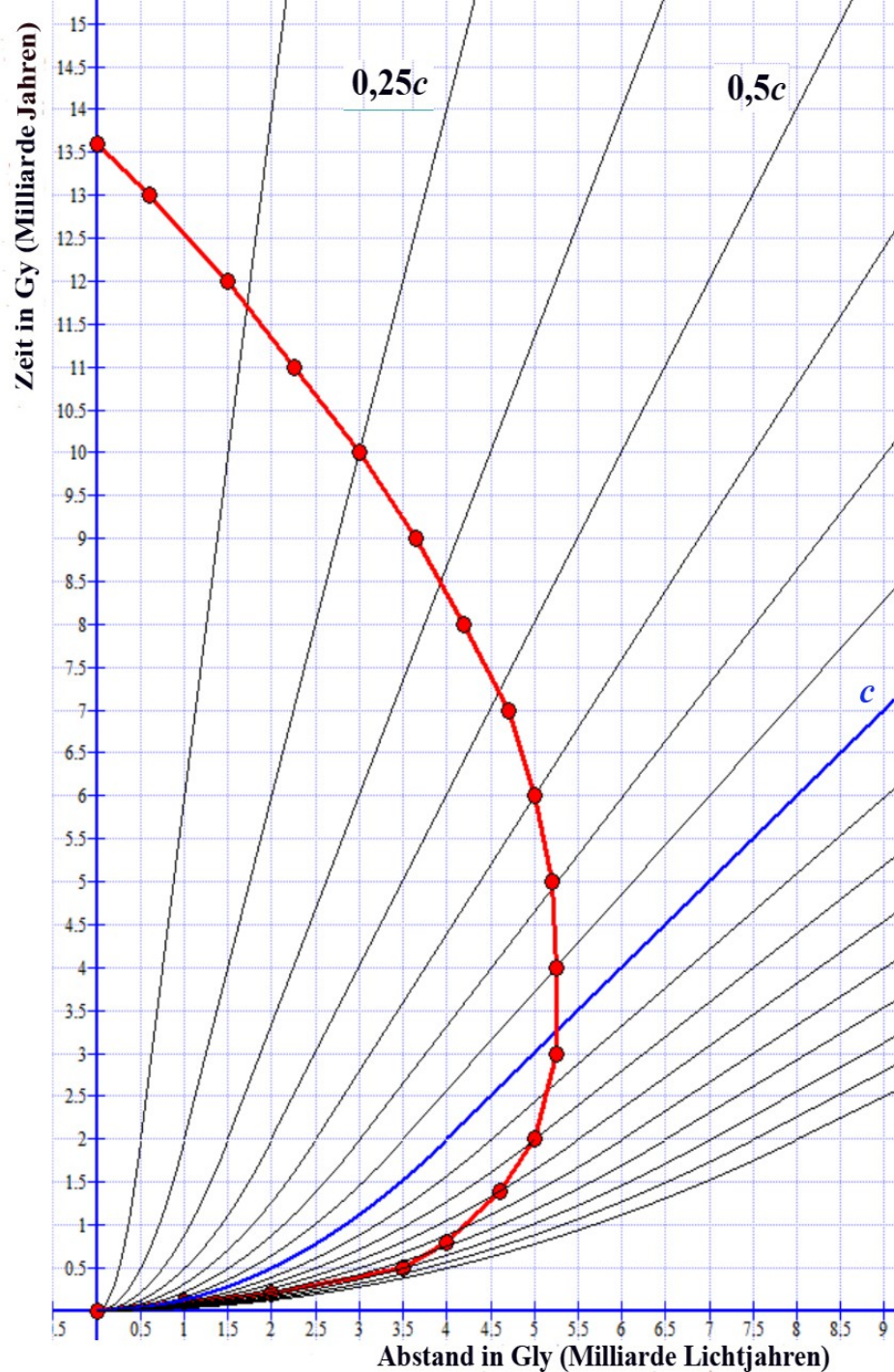
5. Welche Auswirkung hat das Ergebnis der Aufg. 4 auf die Lichtstärke des eintreffenden Lichtes?

(Gehen Sie dabei von der Teilchenstruktur des Lichtes aus und berücksichtigen Sie dabei, dass die Anzahl der ausgehenden Photonen gleich der Anzahl der eintreffenden sein muss)

Das Licht wird zusätzlich geschwächt, da weniger Photonen pro Zeiteinheit ankommen.



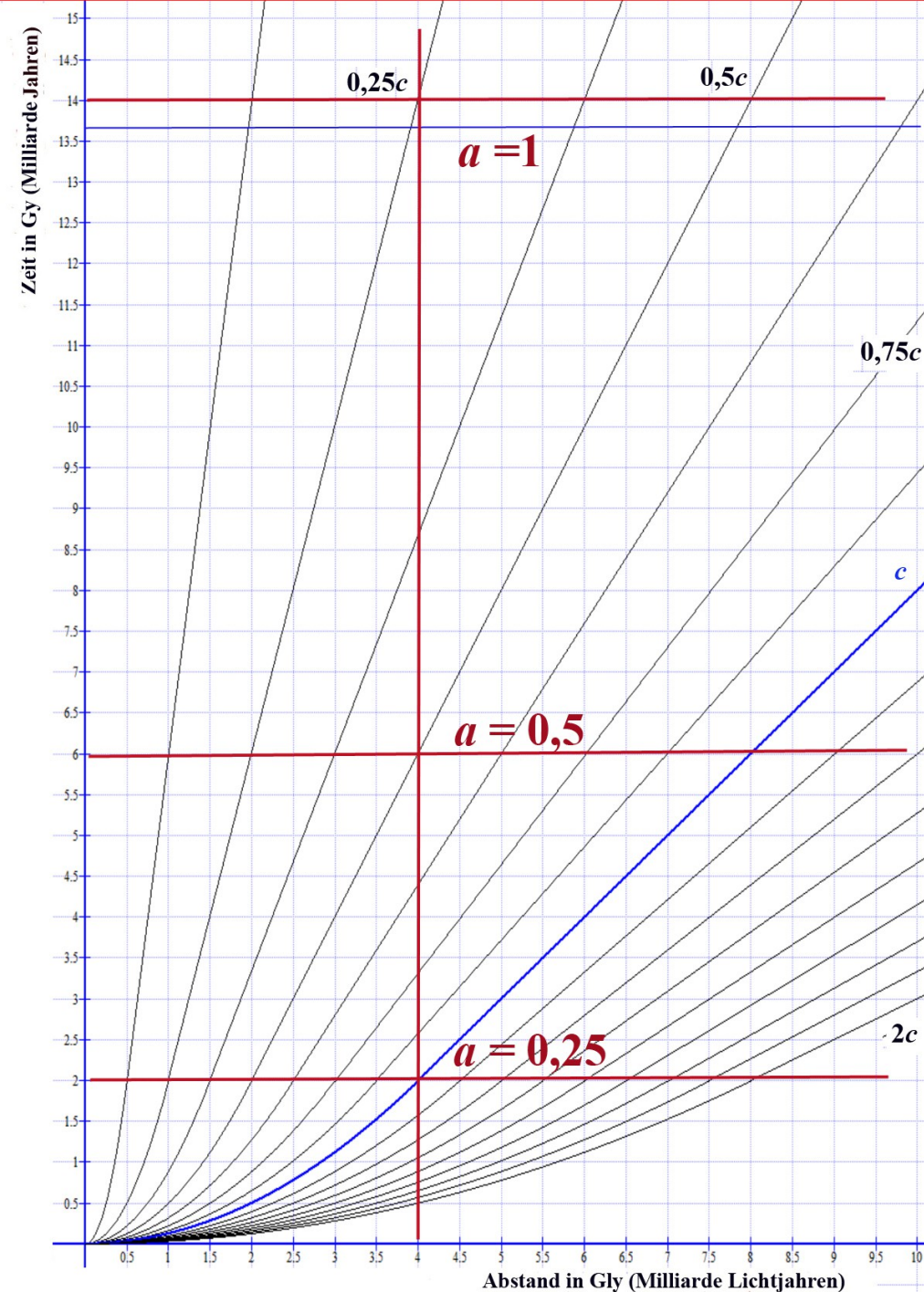
**Ergänzung des
nichtlinearen
Bereiches**



**Der vollständige
Verlauf des
Lichtweges im Raum
– Zeit - Diagramm
vom Urknall bis
heute.**

**Der Verlauf wird
auch als Lichtbirne
bezeichnet.**

Mathematischer Hintergrund zur Erstellung der Kurvenschar



Skalenfaktor a (Skalenparameter):

a gibt an, um wieviel sich eine Länge im Universum aufgrund der Expansion ausgedehnt hat.

$a(t_0) = 1$: Länge heute,

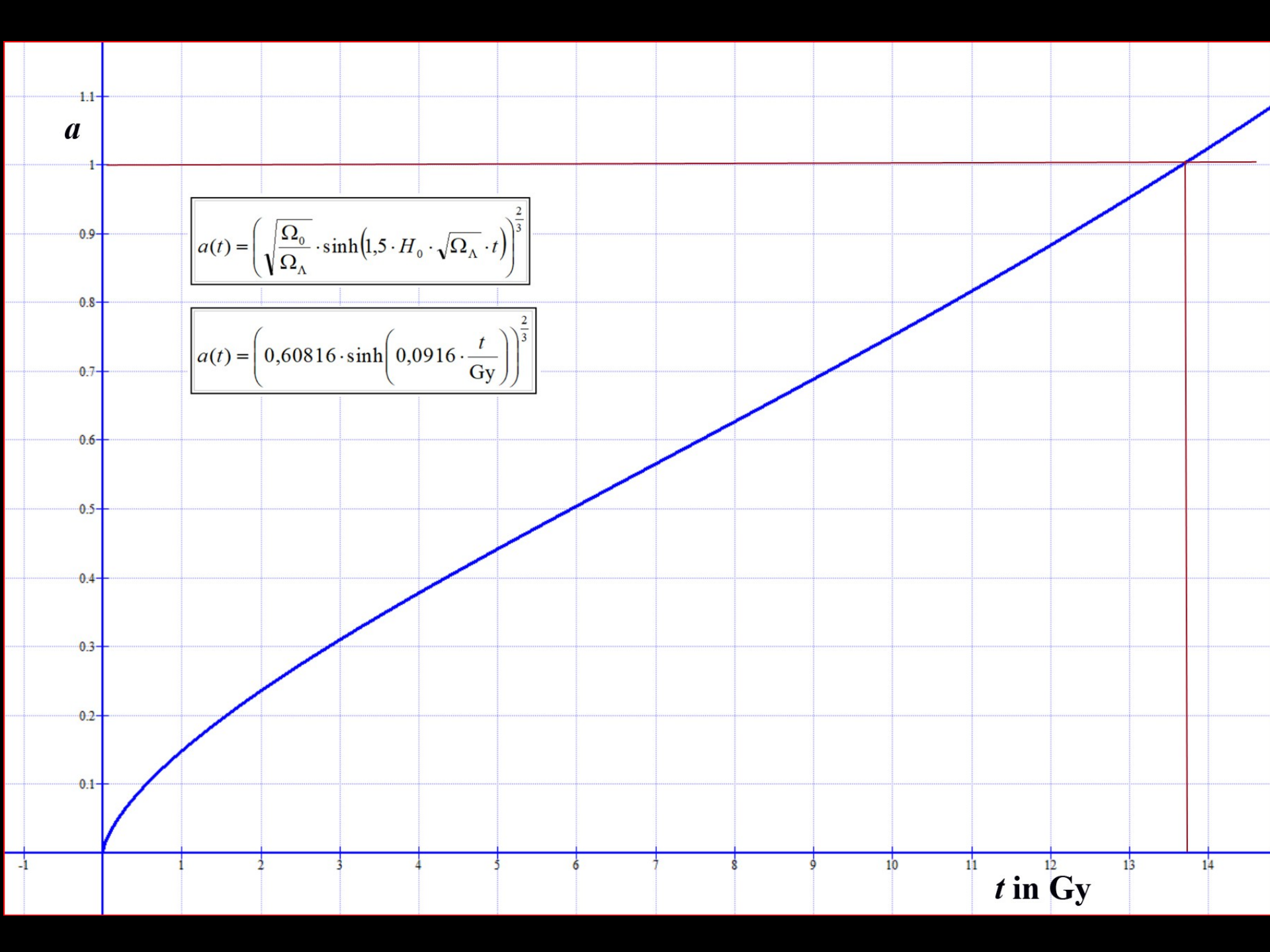
$a(t_1) = 0,5$: halbe Länge gegenüber heute.

a

$$a(t) = \left(\sqrt{\frac{\Omega_0}{\Omega_\Lambda}} \cdot \sinh(1,5 \cdot H_0 \cdot \sqrt{\Omega_\Lambda} \cdot t) \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$a(t) = \left(0,60816 \cdot \sinh\left(0,0916 \cdot \frac{t}{\text{Gy}}\right) \right)^{\frac{2}{3}}$$

***t* in Gy**



a

Für t von 2Gy bis 15Gy

$$a = 0,0625 \cdot t + 0,125$$

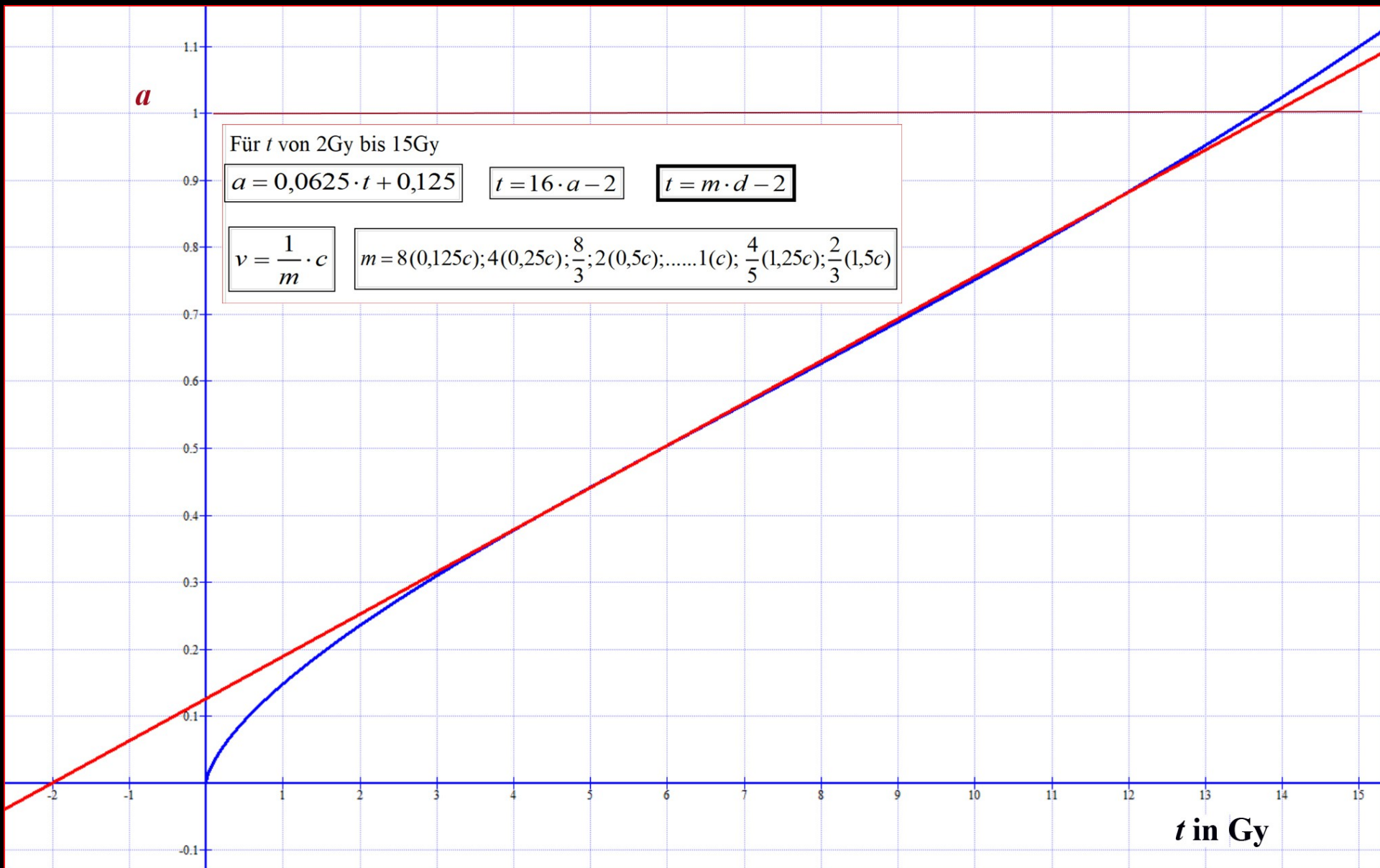
$$t = 16 \cdot a - 2$$

$$t = m \cdot d - 2$$

$$v = \frac{1}{m} \cdot c$$

$$m = 8(0,125c); 4(0,25c); \frac{8}{3}; 2(0,5c); \dots 1(c); \frac{4}{5}(1,25c); \frac{2}{3}(1,5c)$$

t in Gy



a

Für t von 0 bis 2 Gy:

$$a = k_1 \cdot \sqrt{t}$$

$$t = k_2 \cdot a^2$$

$$t = k_2 \cdot (m \cdot d)^2$$

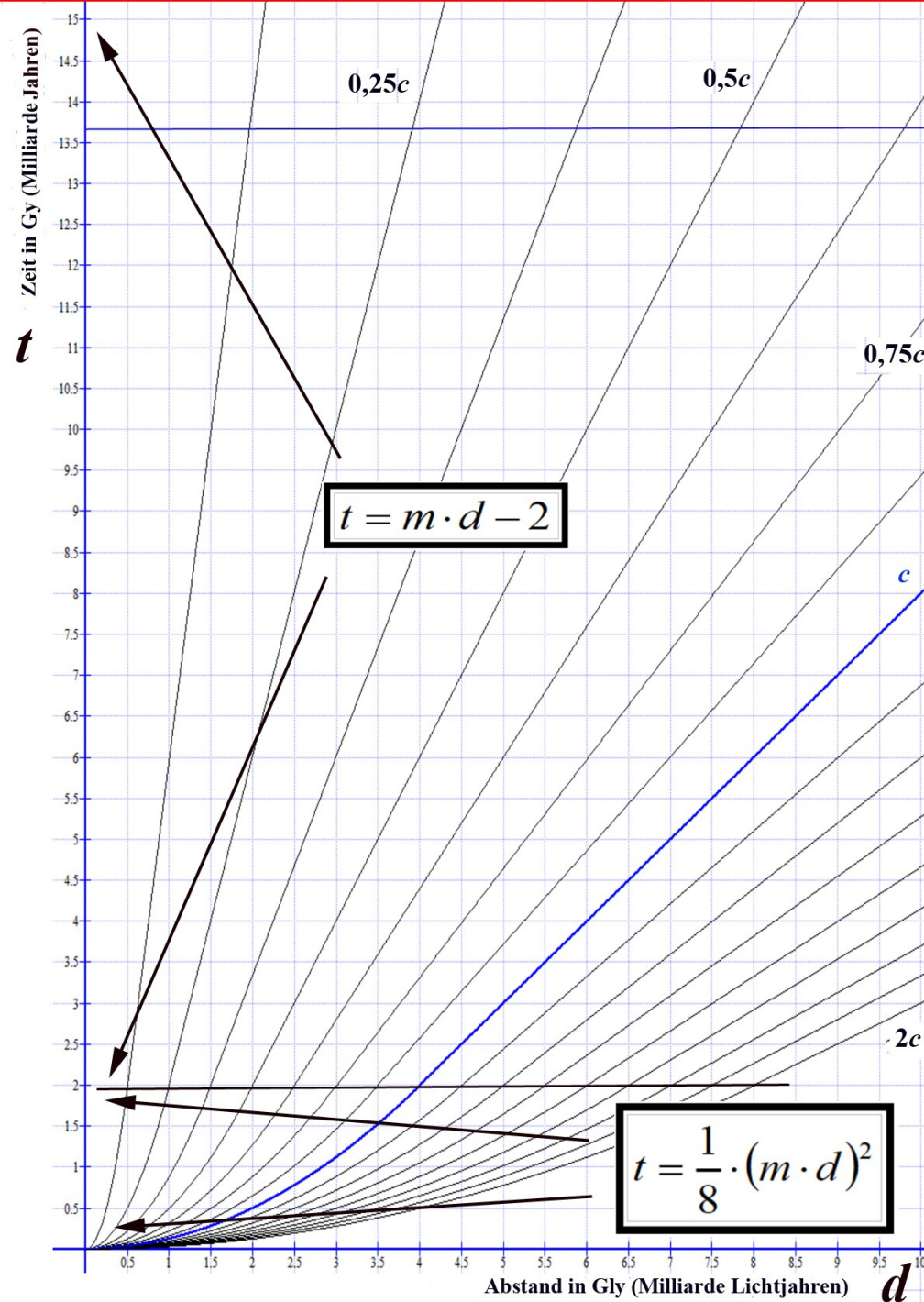
Für $t = 2$:

$$2 = m \cdot d - 2 \Rightarrow m = \frac{4}{d}$$

$$t = k_2 \cdot (m \cdot d)^2 \Rightarrow 2 = k_2 \cdot m^2 \cdot d^2 \Rightarrow k_2 = \frac{2}{m^2 \cdot d^2} = \frac{2 \cdot d^2}{16 \cdot d^2} = \frac{1}{8}$$

$$t = \frac{1}{8} \cdot (m \cdot d)^2$$

t in Gy



Für m können beliebige positive Zahlen eingesetzt werden, hier wurden sie so gewählt, dass bei 2 Gy die Abstände jeweils 0,5 Gly betragen.

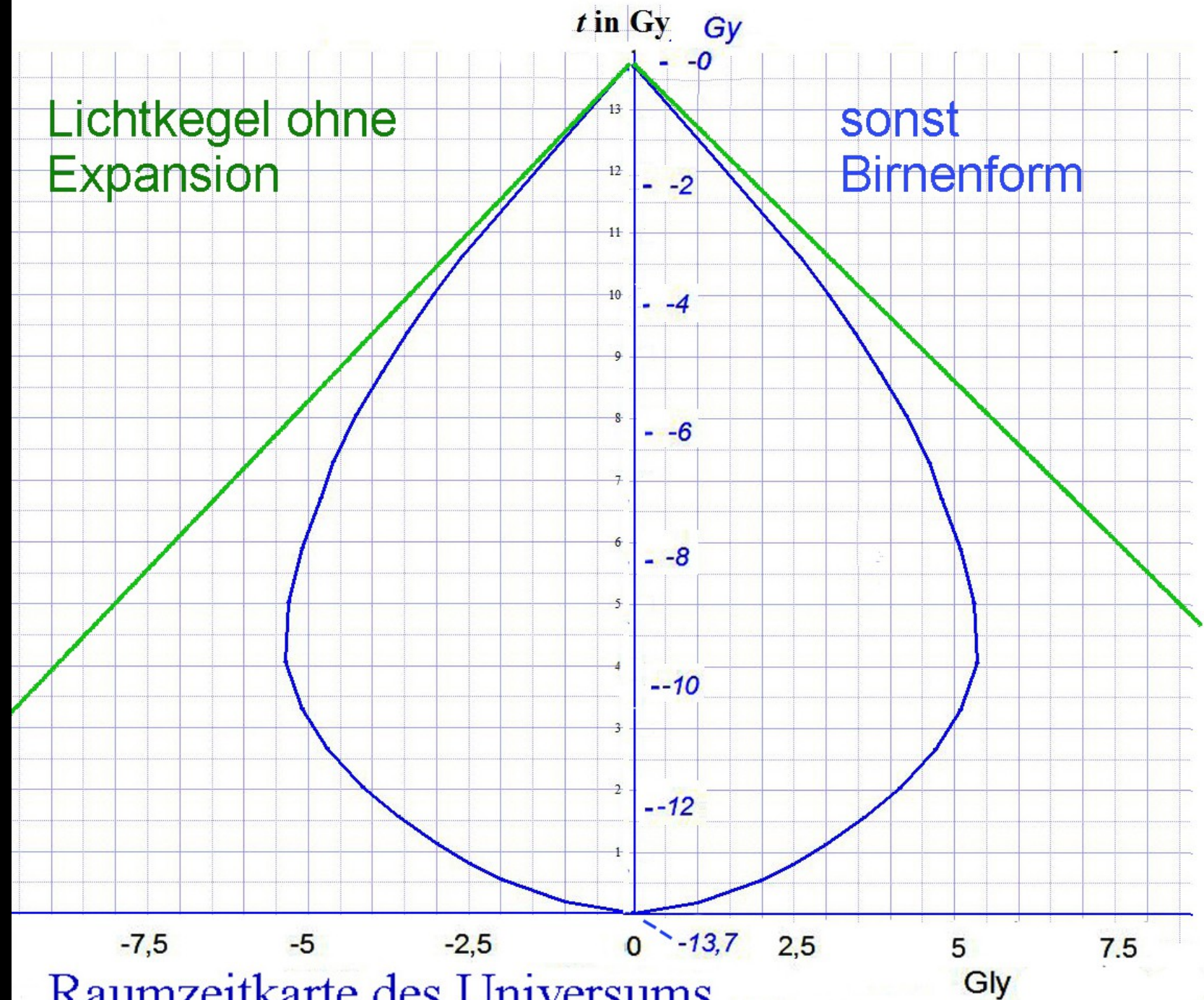
Z. B. $m = 2, \quad v = 0,5c$

$m = 1, \quad v = c$

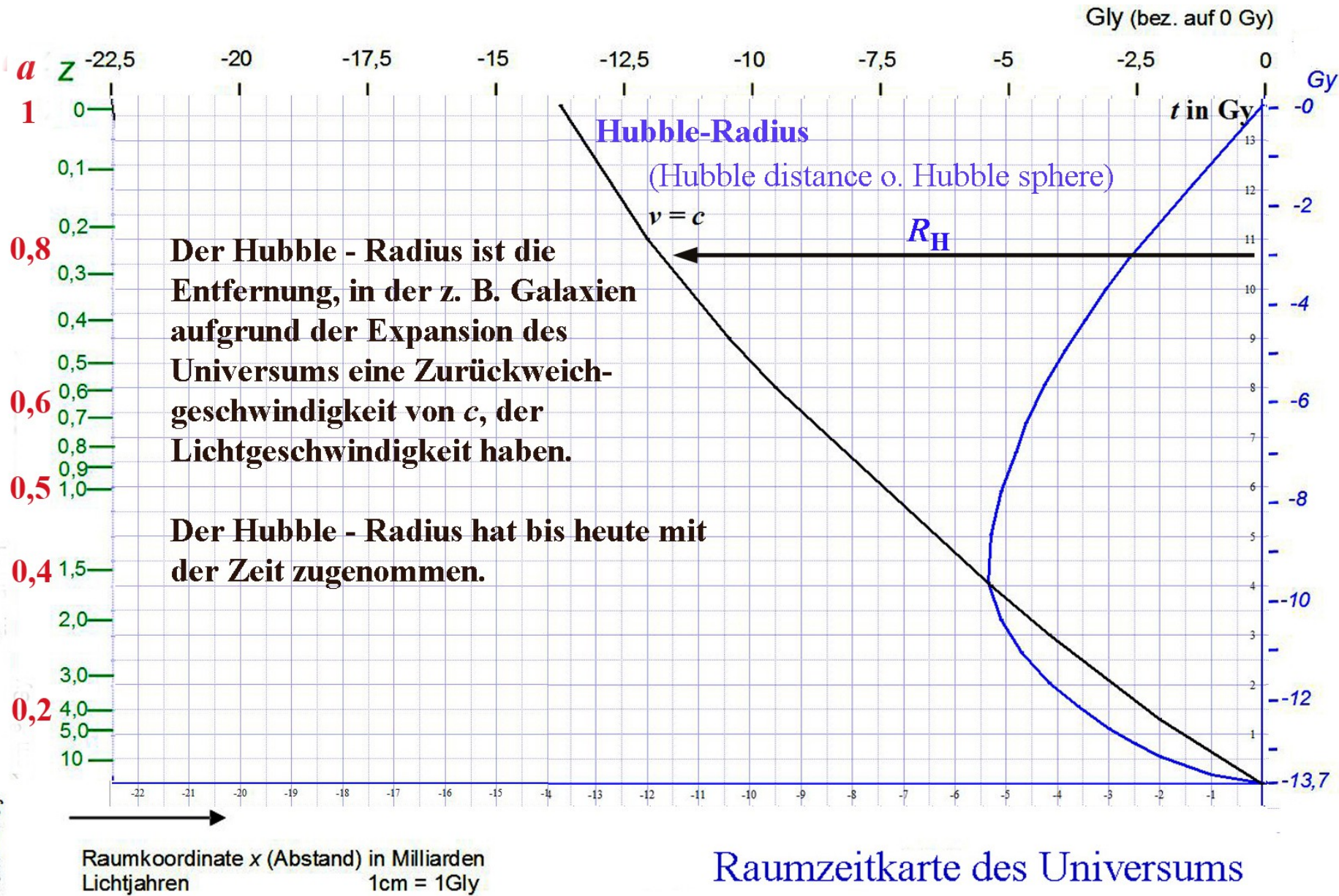
$m = 0,5, \quad v = 2c$

Hubble-Radius (Hubble-Sphäre)

und Hubble – Parameter (Hubble-Konstante)



Zeit t in Milliarden Jahren
1 cm = 1 Gy



Gly (bez. auf 0 Gy)

-17,5

-15

-12,5

-10

-7,5

-5

-2,5

0

Gy

t in Gy

Hubble-Radius

(Hubble distance o. Hubble sphere)

$v = c$

R_H

-18

-17

-16

-15

-14

-13

-12

-11

-10

-9

-8

-7

-6

-5

-4

-3

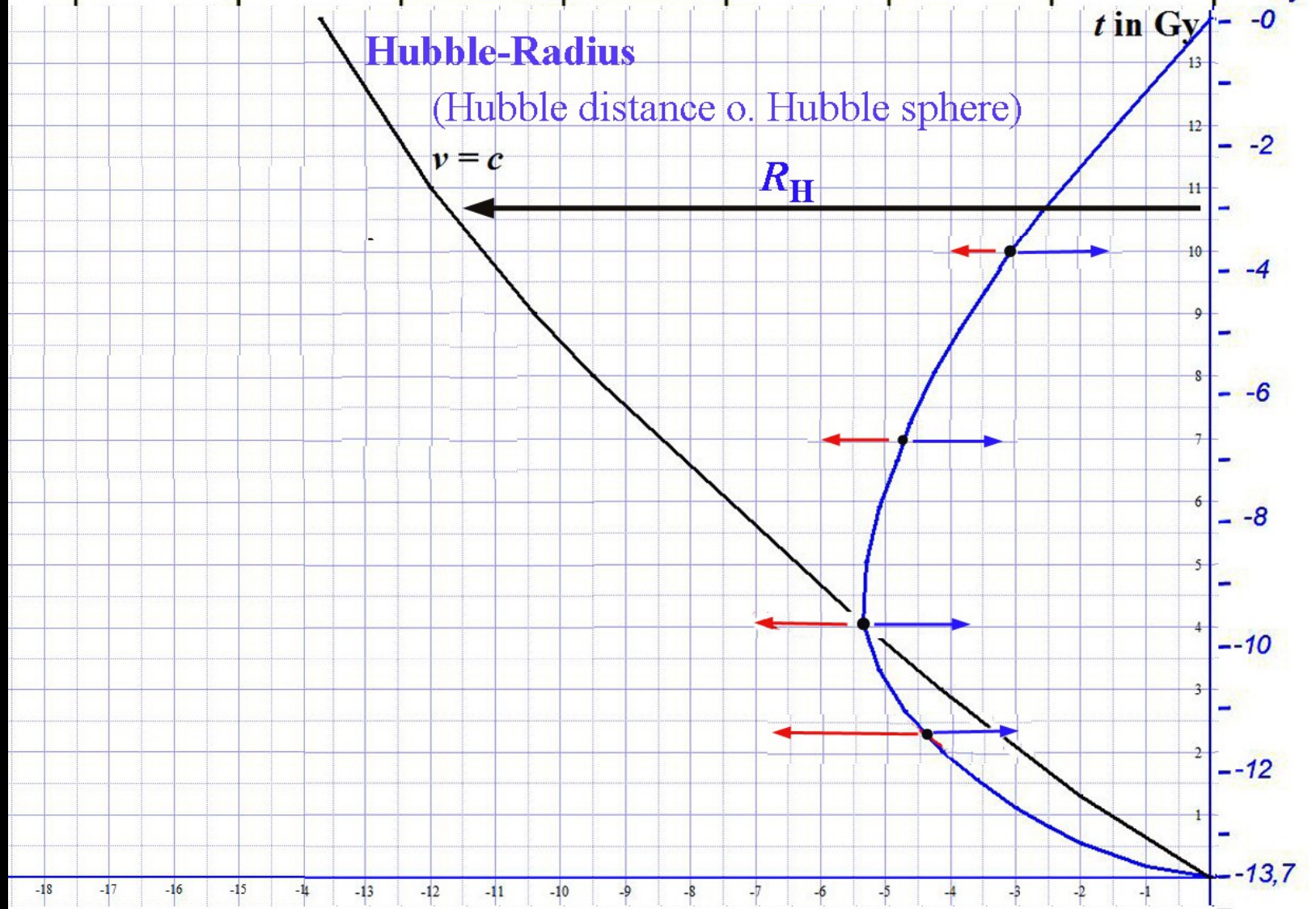
-2

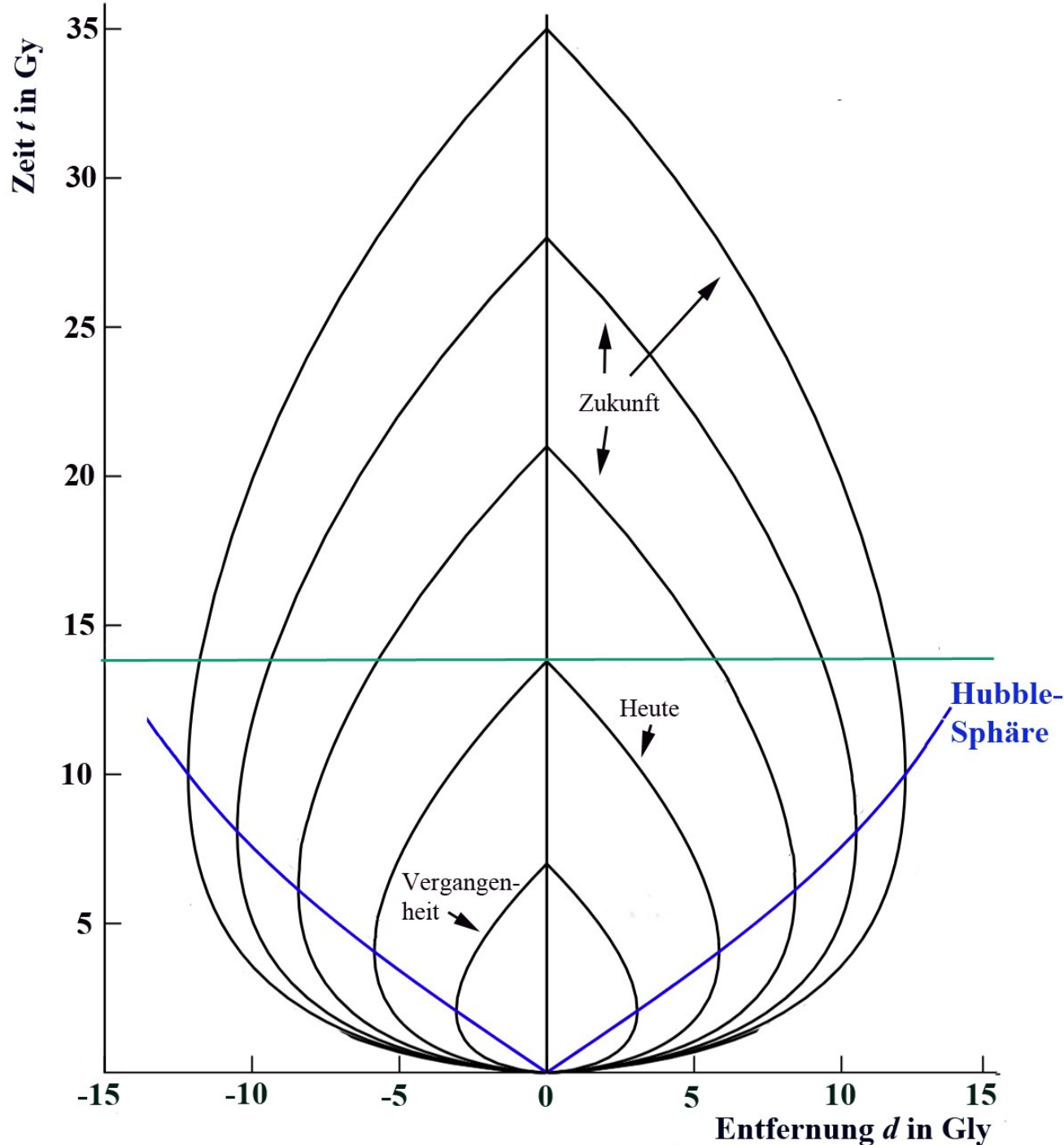
-1

0

-13,7

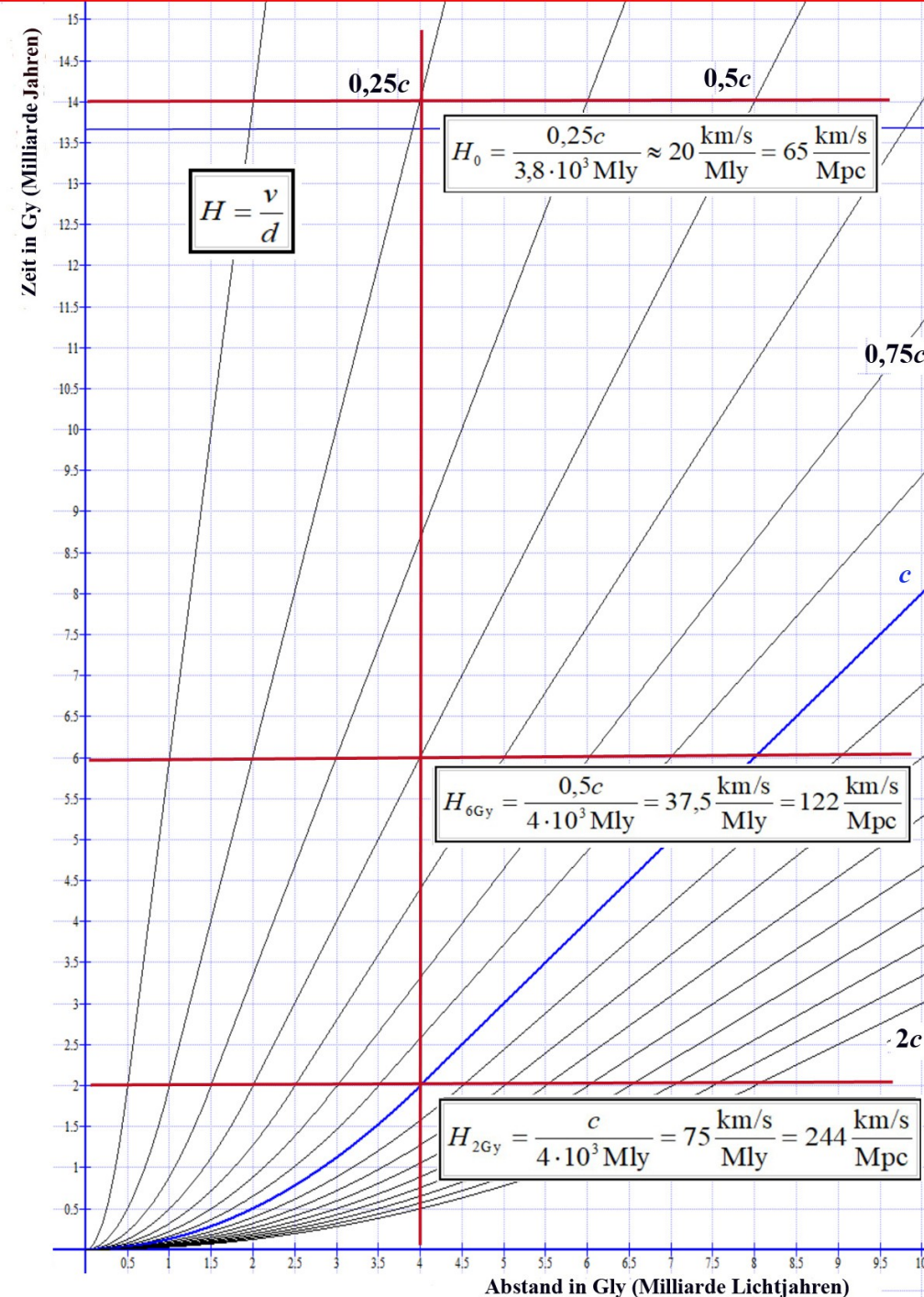
Raumzeitkarte des Universums





Die Hubble-Sphäre schneidet die Lichtbirnen am Bauch (maximale Entfernung), da dort die Richtungs-umkehr des Lichtes stattfindet.

**Der Hubble-Parameter
(auch Hubble-Konstante)
gibt an, wie die
Geschwindigkeit bezogen
auf die Entfernung
zunimmt.**



Auswirkungen der Expansion

Zeit in Gy (Milliarde Jahren)

50

40

30

20

10

Abstand in Gly (Milliarde Lichtjahre)

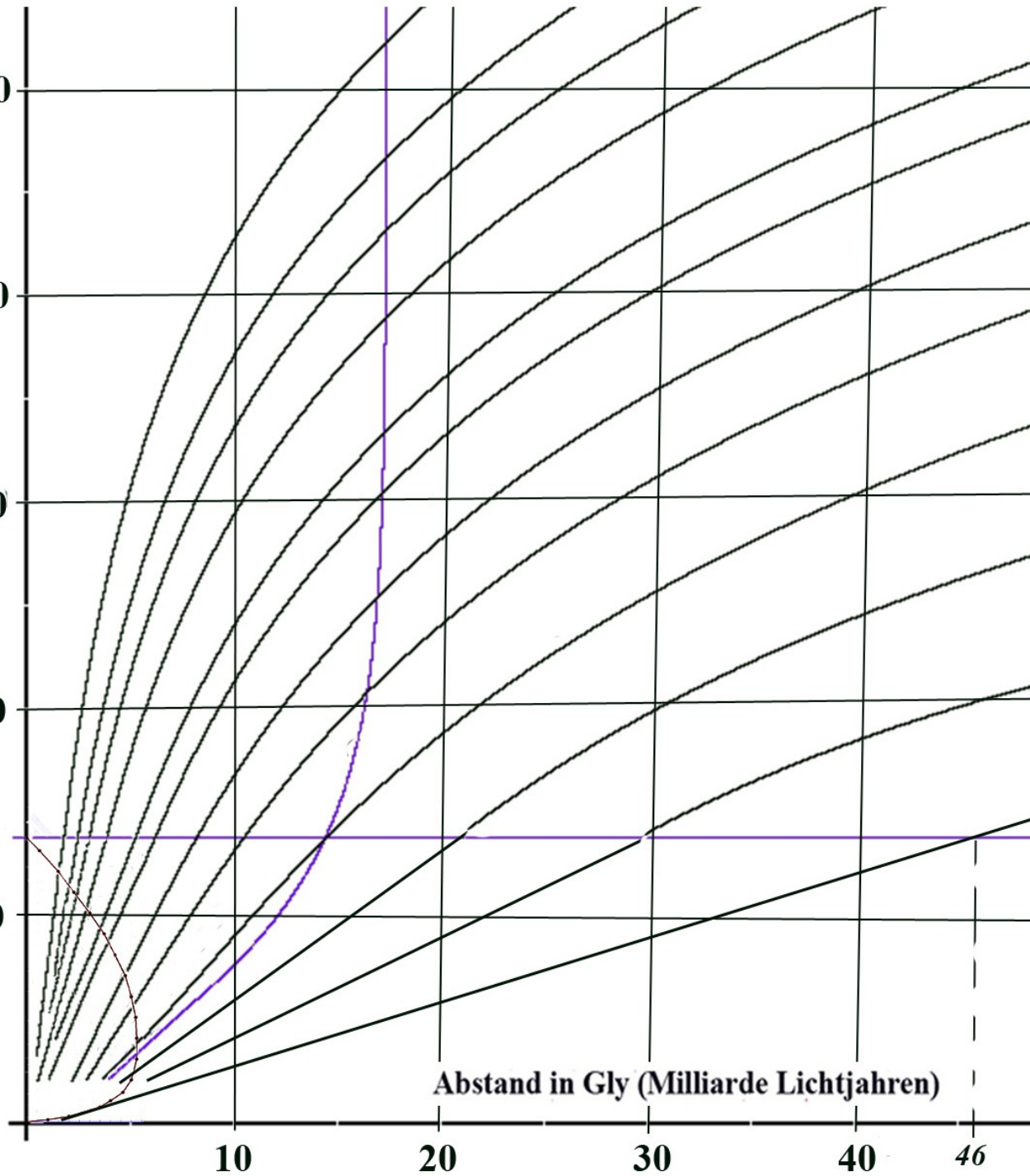
10

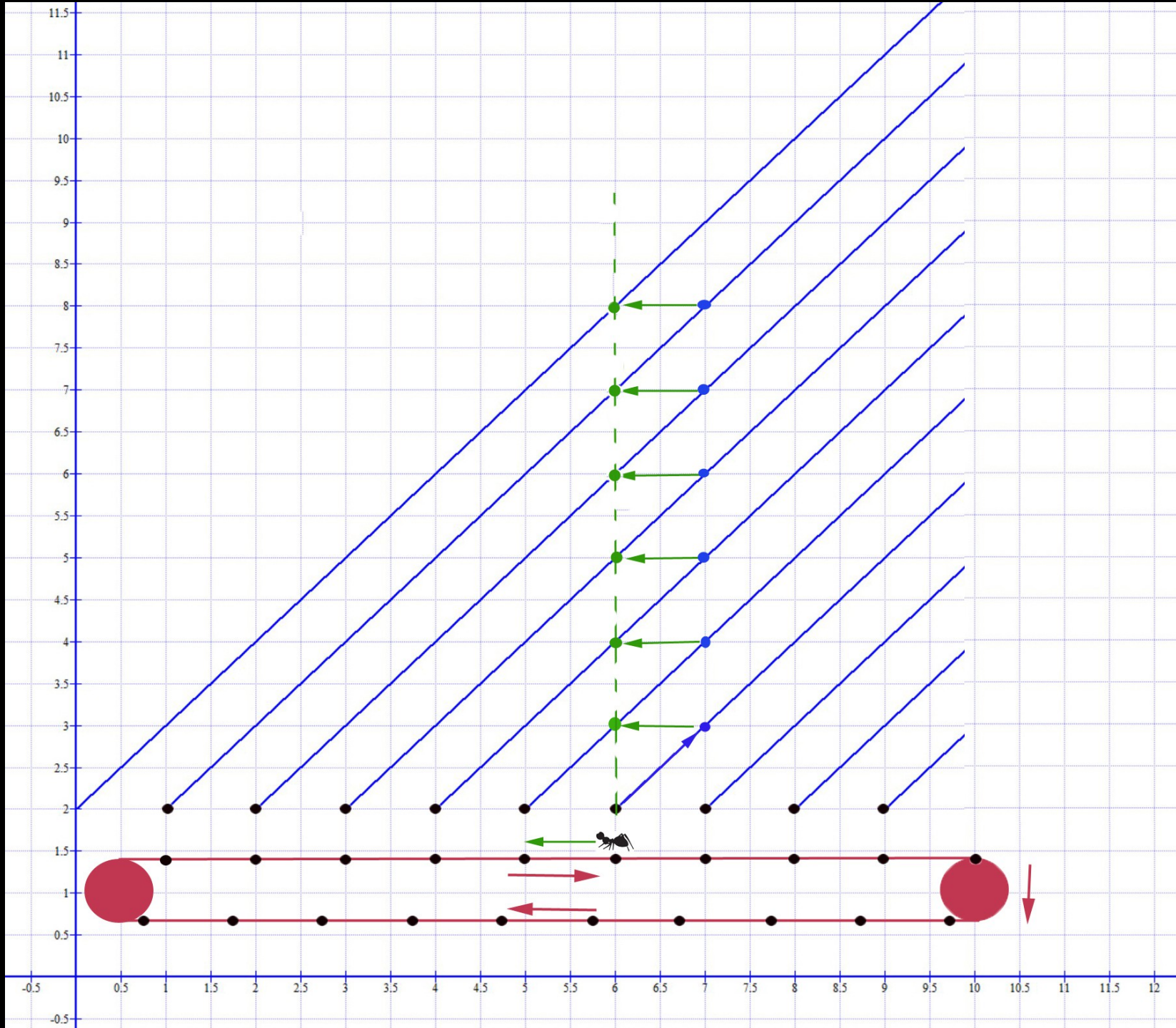
20

30

40

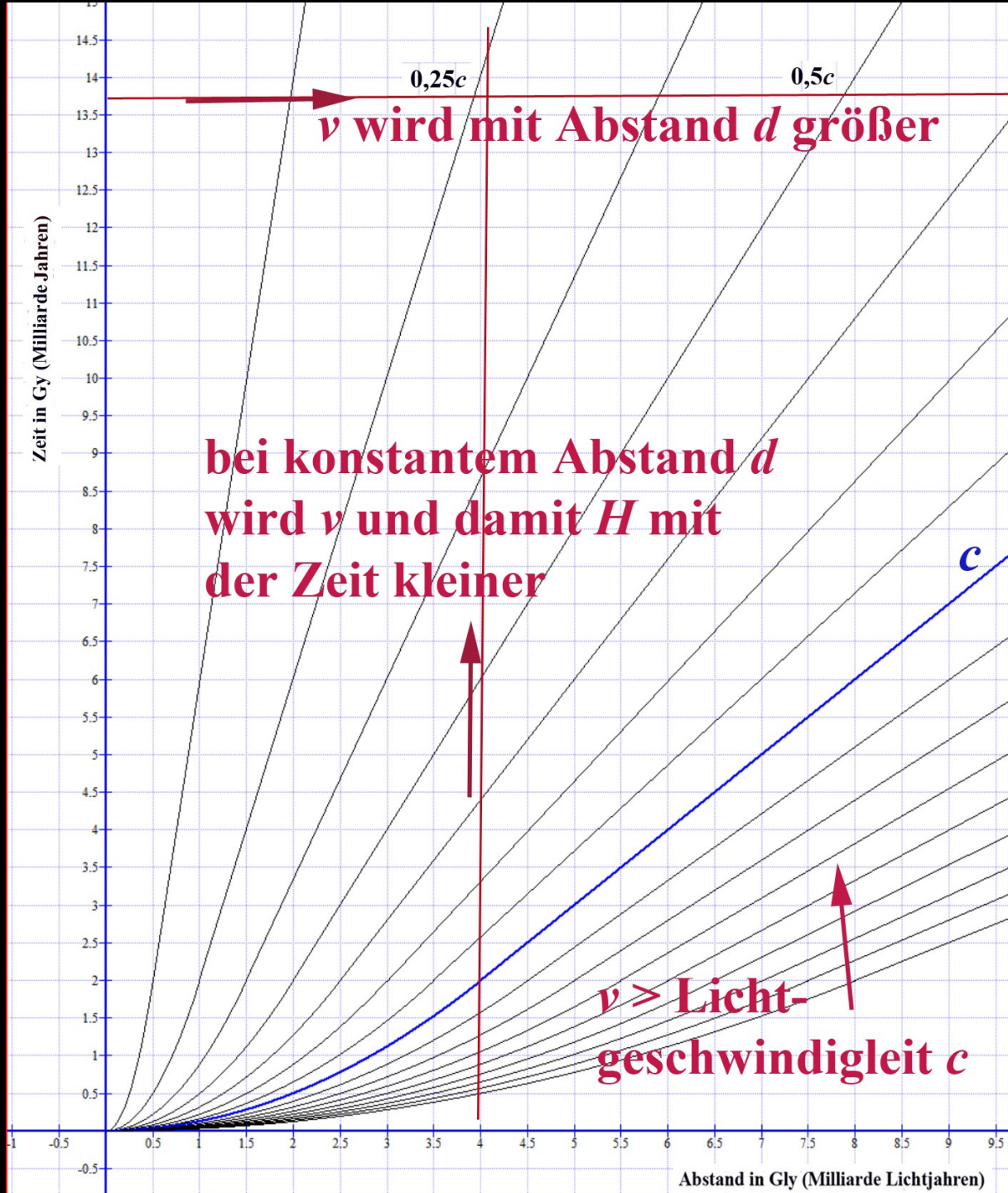
46





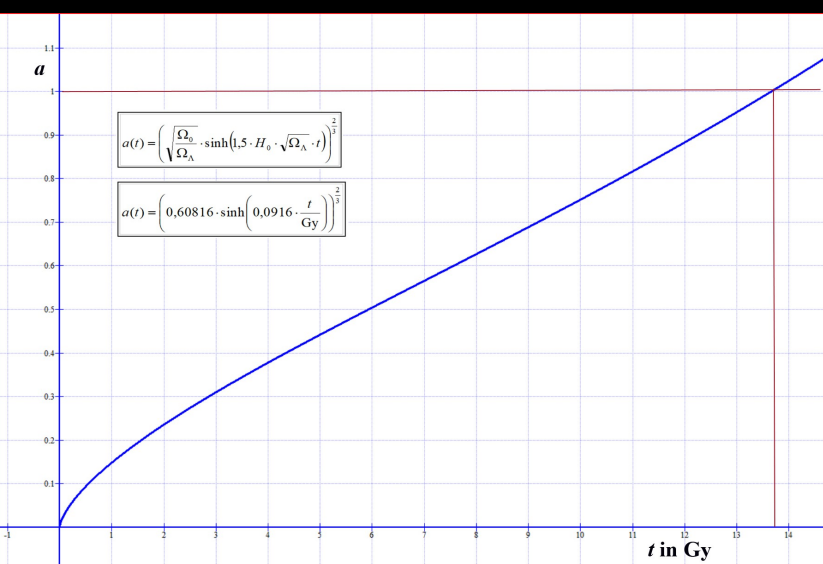
Ergebnisse:

- Die Fluchtbewegung der Galaxien ist keine Bewegung eines Objekts in einem Raum, sondern entsteht durch die Ausdehnung (Expansion) des Raumes. Die kann auch mit Überlichtgeschwindigkeit erfolgen.**
- Durch die Expansion vergrößern sich lediglich die Abstände zwischen den Objekten.**



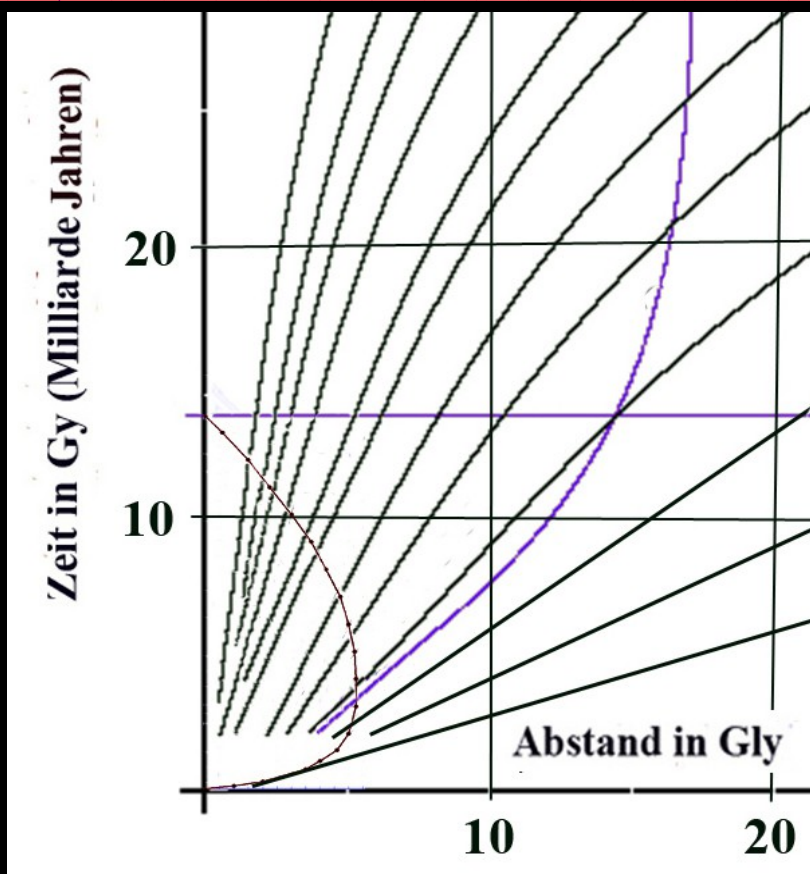
Die Raumausdehnung kann mit einer Kurvenschar dargestellt werden.

Die Expansionsgeschwindigkeit vergrößert sich mit dem Abstand und verringert sich bei gleichem Abstand mit der Zeit.

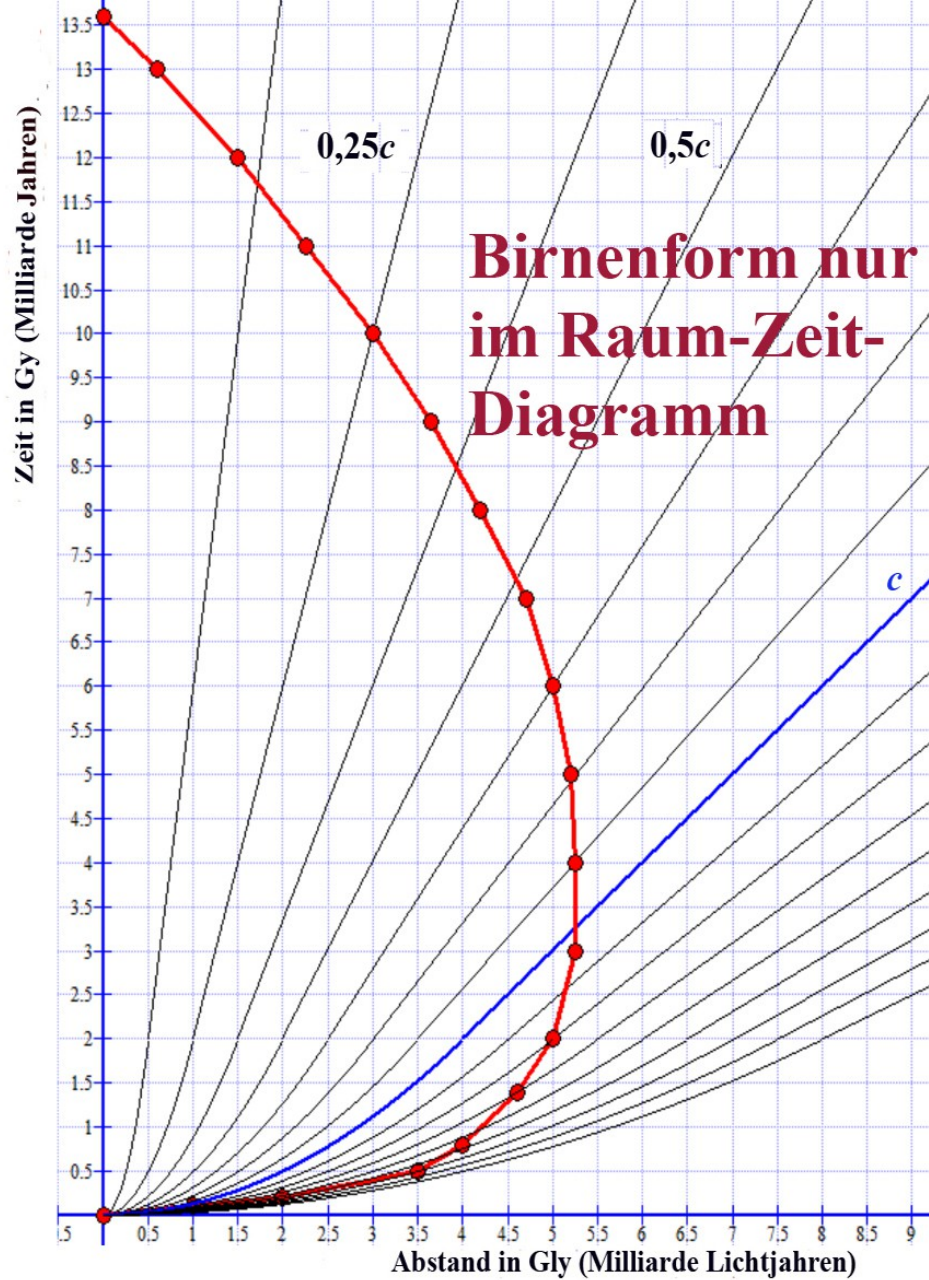


Es wurde nachgewiesen, dass die Expansion nach ca. 7 Gy beschleunigt abläuft.

Der Verlauf der Kurvenschar verändert sich dadurch im Raum-Zeit-Diagramm (s. links).

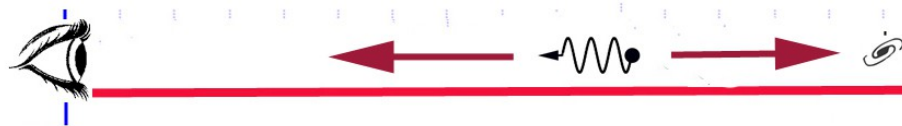


Die weiteren Auswirkungen der Beschleunigung können vorhergesagt werden, wobei noch eine gewisse Unsicherheit besteht.



Das Licht breitet sich im Raum (ohne Hindernisse) immer geradlinig und mit Lichtgeschwindigkeit parallel zur Abstandsachse aus (s. links unten).

Die Birnenform zeigt den Verlauf im Raum-Zeit-Diagramm.



Einsatzmöglichkeiten im Unterricht

Je nach Jahrgang und weiterer Voraussetzungen ist eine Durchführung nach Behandlung von linearen Weg-Zeit-Diagrammen möglich.

Bei leistungstärkeren Klassen kann auch die lineare, evtl. auch die quadratische Kurvenschar von den Schülerinnen und Schülern hergeleitet und erstellt werden.

Häufige falsche Aussagen

- die Hubble-Konstante ist eine Konstante
- eine Expansion $>$ Lichtgeschwindigkeit ist nicht möglich
- Objekte, die sich mit $> c$ aufgrund der Expansion von uns fortbewegen sind für uns nicht sichtbar
- durch die Expansion verringert sich c
- der wahre Lichtwegverlauf ist durch die Expansion birnenförmig
- durch die Expansion wird die Zeit gedehnt

The background of the slide is a deep space image featuring a dark, star-filled sky. Numerous small, distant stars are visible, some appearing as bright points of light and others as fainter, reddish or bluish specks. Three prominent galaxies are visible: a vertical, elongated, and somewhat irregular galaxy on the left side, and two spiral galaxies on the right side, one near the top and one near the bottom. The text is overlaid in a bright yellow color.

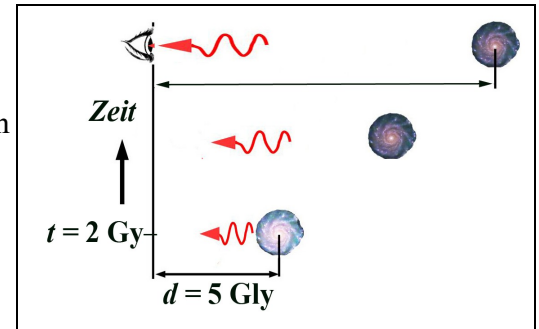
Vielen Dank

für das Interesse

und die Mitarbeit

Ein Quasar begann vor 2 Milliarden Jahre nach dem Urknall für einen Zeitraum von 500 Millionen Jahren so zu strahlen, dass er noch nach ca. 13 Milliarden Jahren mit entsprechenden Teleskopen wahrgenommen werden könnte. Seine Entfernung betrug damals 5 Milliarden Lichtjahre.

Aufgrund der Expansion des Universums entfernte er sich mit 1,25 fachen Lichtgeschwindigkeit von uns weg. Es soll untersucht werden, ob sein Licht uns jemals erreicht und in welchem Zeitraum das dann wäre.



Gehen Sie dabei wie folgt vor:

1. Erstellen Sie mit Hilfe der Seite 2 den Lichtweg für die Aussendung des Lichtes des Quasars zum Zeitpunkt 2 Gy im Raum-Zeit-Diagramm. Verwenden Sie folgendes Näherungsverfahren, dass jedoch zuverlässige Werte liefert. Dabei wird jeweils für einen Zeitraum von einem Gigajahr zunächst der Weg des Lichtes durch die Expansion ermittelt und mit Hilfe der Kurvenschar eingetragen (blauer Pfeil) und anschließend der Weg des Lichtes aufgrund der Lichtgeschwindigkeit hinzugefügt (grüner Pfeil).

2. Nach wie vielen Jahren (ca.) nach dem Urknall wäre eine Beobachtung möglich?

3. 500 Millionen Jahre nach dieser ersten Ausstrahlung, also 2,5 Gy nach dem Urknall vermindert sich seine Helligkeit extrem, sodass er für uns nicht mehr sichtbar wäre.

Ergänzen Sie dazu auf Seite 3 das Raum – Zeit – Diagramm und ermitteln Sie den Zeitpunkt, ab dem der Quasar nicht mehr wahrgenommen werden kann.

4. In welchem Zeitintervall konnte der Quasar bei uns beobachtet werden? Vergleichen Sie diesen Wert mit dem Zeitintervall der Aussendung von 500 Millionen Jahren.

5. Welche Auswirkung hat das Ergebnis der Aufg. 4 auf die Lichtstärke des eintreffenden Lichtes?

(Gehen Sie dabei von der Teilchenstruktur des Lichtes aus und berücksichtigen Sie dabei, dass die Anzahl der ausgehenden Photonen gleich der Anzahl der eintreffenden sein muss)

