



[\[zurück\]](#) [\[Anfang\]](#) [\[Start\]](#) [\[Stichwörter\]](#)

[\[weiter\]](#) [\[Ende\]](#) [\[Home\]](#) [\[Glossar\]](#)

# Freier Fall

<http://www.rittershofer.de/physik/ff/freifall.htm>

Jeder Skydiver sagt, er befinde sich zwischen dem Absprung vom Flugzeug und dem Öffnen des Schirms im freien Fall. Für den Physiker dagegen ist der freie Fall eine Fallbewegung nur unter dem Einfluss der Schwerkraft, also ohne weitere äußere Einwirkungen wie Reibung, insbesondere Luftwiderstand. Vom Standpunkt des Physikers aus führen Skydiver also keinen freien Fall aus - es sei denn, sie sprängen im Vakuum.

An dieser Stelle betrachten wir den tatsächlichen freien Fall. Hierfür gilt:

$$F = m \cdot g$$

$$s = \frac{1}{2} g t^2$$

$$v = g \cdot t$$

Es ist sofort zu sehen, dass mit zunehmender Fallzeit auch die Fallgeschwindigkeit immer größer wird.

Betrachten wir das mit Hilfe eines Tabellenkalkulationprogrammes: Als Konstante vorgegeben ist die Erdbeschleunigung, dann werden in Sekundenabständen Geschwindigkeit und Weg angegeben:

# Skydive 1

© Andreas Rittershofer 2000-07-15

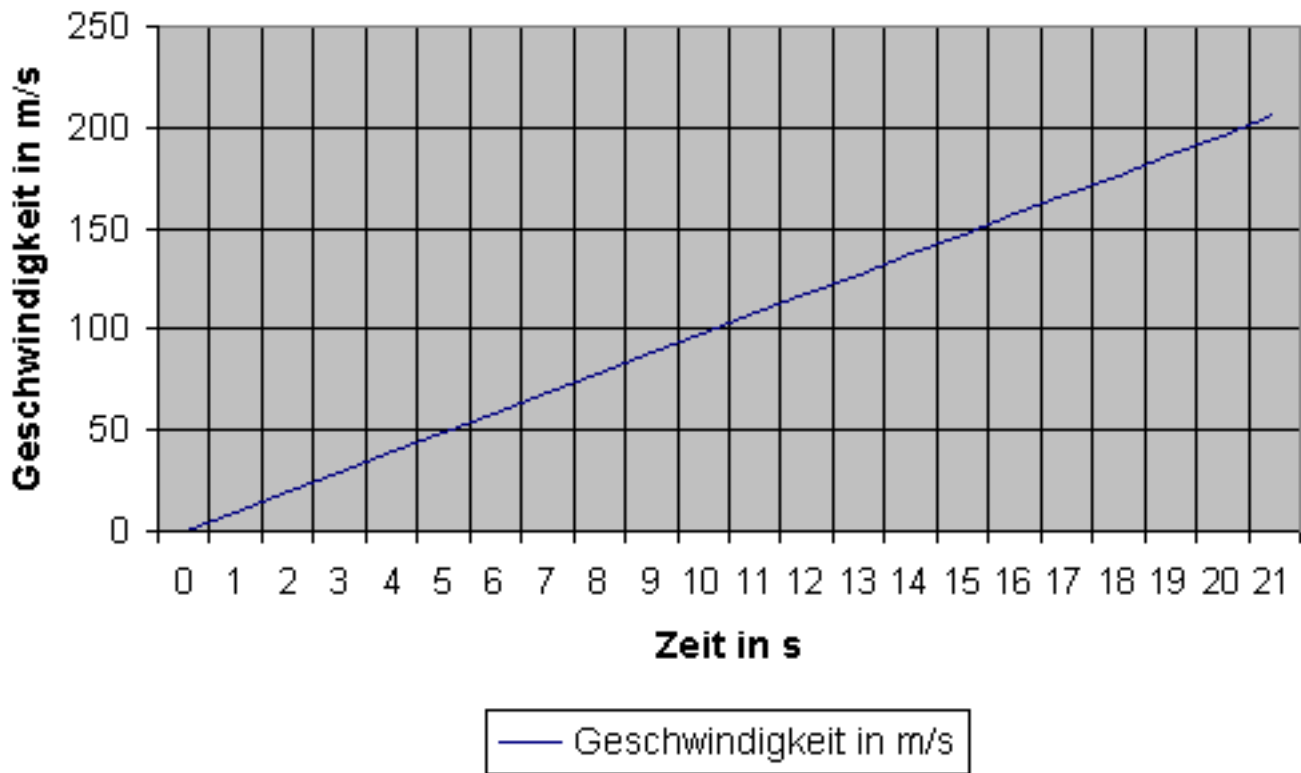
Freier Fall, also ohne Luftwiderstand.

Erdbeschleunigung g 9,81

Zeit in s	Geschwindigkeit in m/s	Geschwindigkeit in km/h	Weg in m
0	0	0	0
1	9,81	35,32	4,91
2	19,62	70,63	19,62
3	29,43	105,95	44,15
4	39,24	141,26	78,48
5	49,05	176,58	122,63
6	58,86	211,90	176,58
7	68,67	247,21	240,35
8	78,48	282,53	313,92
9	88,29	317,84	397,31
10	98,10	353,16	490,50
11	107,91	388,48	593,51
12	117,72	423,79	706,32
13	127,53	459,11	828,95
14	137,34	494,42	961,38
15	147,15	529,74	1103,63
16	156,96	565,06	1255,68
17	166,77	600,37	1417,55
18	176,58	635,69	1589,22
19	186,39	671,00	1770,71
20	196,20	706,32	1962,00
21	206,01	741,64	2163,11

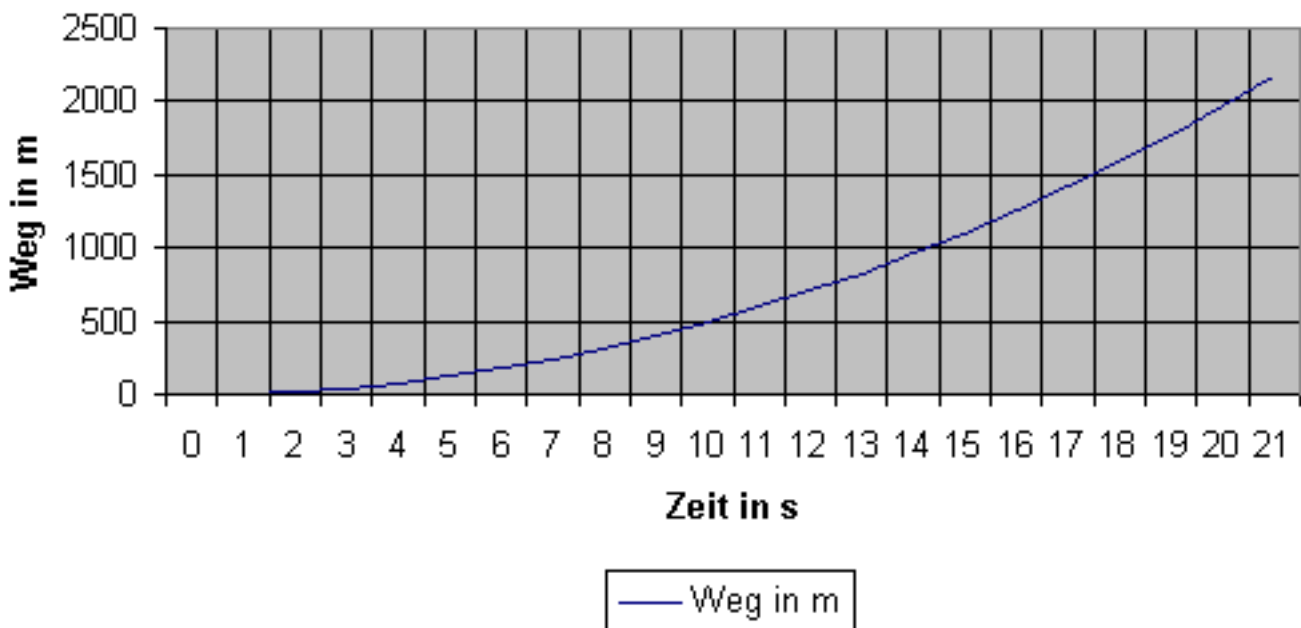
Die Geschwindigkeit nimmt linear zu; da von Reibung - z.B. Luftwiderstand - völlig abgesehen, gibt es für sie keine Schranke:

### Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm



Der Weg nimmt quadratisch mit der Zeit zu:

### Weg-Zeit-Diagramm



Das vollständige Excel-Arbeitsblatt steht hier zum [Download](#) zur Verfügung.

[\[zurück\]](#) [\[Anfang\]](#) [\[Start\]](#) [\[Stichwörter\]](#)

[\[weiter\]](#) [\[Ende\]](#) [\[Home\]](#) [\[Glossar\]](#)

---

© [Andreas Rittershofer](#) 1.7.1997

Letzte Änderung: 2000-07-15



[\[zurück\]](#) [\[Anfang\]](#) [\[Start\]](#) [\[Stichwörter\]](#)

[\[weiter\]](#) [\[Ende\]](#) [\[Home\]](#) [\[Glossar\]](#)

# Luftwiderstand

<http://www.rittershofer.de/physik/ff/lwid.htm>

Alle bisherigen Überlegungen haben keinerlei Reibungskräfte berücksichtigt. Dies vereinfachte zwar vieles, hat aber mit der realen Situation nicht viel gemein, wo der Luftwiderstand eine sehr wichtige Rolle spielt.

Im Abschnitt über den [freien Fall](#) wurde gezeigt, dass die Fallgeschwindigkeit mit wachsender Fallzeit ständig zunimmt. Dies gilt aber nur bei Abwesenheit jedweder Reibungskraft.

Beim Fall im Luftraum ist ein Kräftegleichgewicht zu betrachten, da auf den Fallschirmspringer zwei Kräfte wirken: einerseits die Gravitationskraft, andererseits die Luftwiderstandskraft:

$$F = m \cdot g$$

$$F = \frac{1}{2} c_w A \rho v^2$$

Dabei ist  $m$  die Masse des Springers,  $g$  die Erdbeschleunigung,  $c_w$  der Luftwiderstandsbeiwert des Springers (ein einheitenloser Wert, der nur von der Form, in diesem Fall der Körperhaltung, abhängig ist),  $A$  die Querschnittsfläche,  $\rho$  die Luftdichte und  $v$  die Geschwindigkeit; man sieht, dass der Luftwiderstand quadratisch von der Geschwindigkeit abhängt.

Diese beiden Kräfte sind bei einer bestimmten Fallgeschwindigkeit im Gleichgewicht.

$$mg = \frac{1}{2} c_w A \rho v^2$$

Diese Geschwindigkeit lässt sich durch Auflösen nach  $v$  bestimmen:

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{c_w A \rho}}$$

Unter der Annahme der Werte  $m=80\text{kg}$ ,  $g=9,81\text{m/s}^2$ ,  $c_w=0,34$  (Halbkugel),  $A=1\text{m}^2$  und  $\rho=1,2929\text{kg/m}^3$  ergibt sich daraus eine maximale Fallgeschwindigkeit für einen Fallschirmspringer im Luftraum von  $59,8\text{m/s}$  bzw.  $215,3\text{km/h}$  - ein realistischer Wert. Selbstverständlich hängt diese Geschwindigkeit von der Masse, der Größe, der Körperhaltung, der Kleidung des Springers ab, ferner von der Luftdichte, diese wiederum von Temperatur und Höhe.

Wir haben bei der bisherigen Rechnung nur die Grenzggeschwindigkeit berechnet und betrachtet, nicht aber den dynamischen Vorgang, wie diese erreicht wird und welcher Weg dabei zurückgelegt wird. Dies ist z.B. mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes möglich.

Die Luftwiderstandskraft ist - wie bereits oben genannt - gegeben mit:

$$F_L = \frac{1}{2} c_w A \rho v^2 = k \cdot v^2$$

Der Einfachheit halber fassen wir alle konstanten Größen zur Konstanten  $k$  zusammen; diese ist für Menschen etwa  $0,3\text{kg/m}$ .

Die beschleunigende Kraft ist dann nicht mehr die Gewichtskraft  $F=m \cdot g$ , sondern:

$$F = F_G - F_L = mg - kv^2$$

Die Beschleunigung ergibt sich damit zu:

$$a = \frac{F}{m} = g - \frac{k}{m} v^2$$

Mit unserer Schulmathematik können wir hier keine einfache Formel mehr für das Weg-Zeit-Gesetz angeben, da die Beschleunigung von der Geschwindigkeit abhängig ist. Eine schrittweise Näherungsrechnung ist aber möglich: wir nähern die Bewegung an, indem wir sie in kleine Abschnitte zerlegen, in denen wir Geschwindigkeit und Beschleunigung als konstant ansehen.

1. Setze  $k$  fest.
2. Setze die Anfangswerte für  $s$ ,  $v$ ,  $a$ ,  $t$ .

3. Erhöhe  $s$  um  $\Delta s = v \cdot \Delta t$

4. Berechne  $a$  nach  $g - (k/m)v^2$

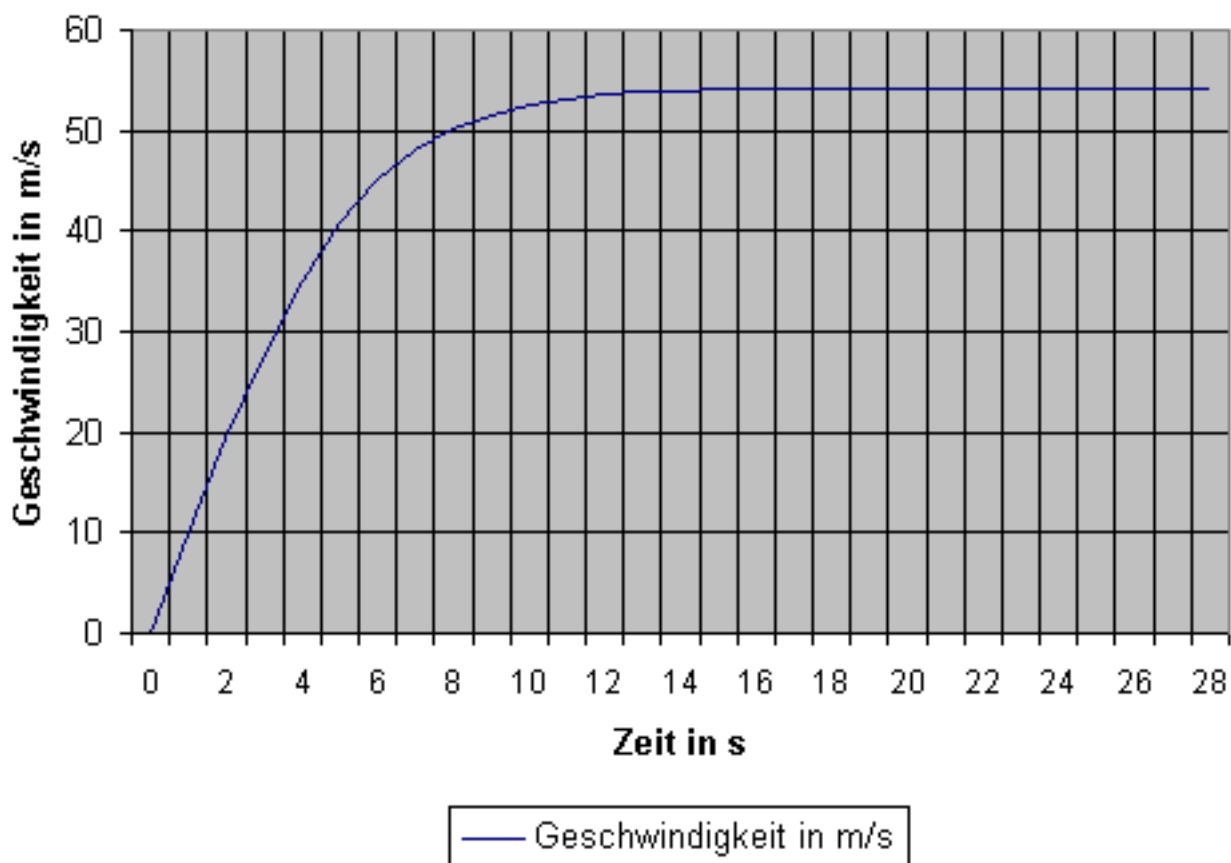
5. Erhöhe  $v$  um  $\Delta v = a \cdot \Delta t$
6. Erhöhe  $t$  um  $\Delta t$
7. Wiederhole ab Nr. 3.

Damit ergibt sich tabellarisch:

<b>Skydive 2</b>				
© Andreas Rittershofer 2000-07-15				
Fall mit Luftwiderstand.				
Erdbeschleunigung $g$ in $m/(s^2)$		9,81		
Bremskonstante $k$ in $kg/m$		0,3		
Masse $m$ in $kg$		90		
Zeit in s	Geschwindigkeit in $m/s$	Geschwindigkeit in $km/h$	Weg in m	Beschleunigung in $m/(s^2)$
0	0	0,00	0	9,81
1	9,81	35,32	9,81	9,81000
2	19,30	69,48	19,62	9,48921
3	27,87	100,32	38,92	8,56847
4	35,09	126,32	66,79	7,22131
5	40,79	146,86	101,88	5,70588
6	45,06	162,21	142,67	4,26260
7	48,10	173,16	187,73	3,04275
8	50,20	180,71	235,83	2,09790
9	51,61	185,79	286,03	1,41050
10	52,54	189,15	337,64	0,93184
11	53,15	191,34	390,18	0,60834
12	53,54	192,75	443,32	0,39402
13	53,80	193,67	496,87	0,25389
14	53,96	194,26	550,66	0,16305
15	54,06	194,63	604,62	0,10448
16	54,13	194,87	658,69	0,06686
17	54,17	195,03	712,82	0,04275
18	54,20	195,12	766,99	0,02732
19	54,22	195,19	821,19	0,01745
20	54,23	195,23	875,41	0,01114
21	54,24	195,25	929,64	0,00711
22	54,24	195,27	983,88	0,00454

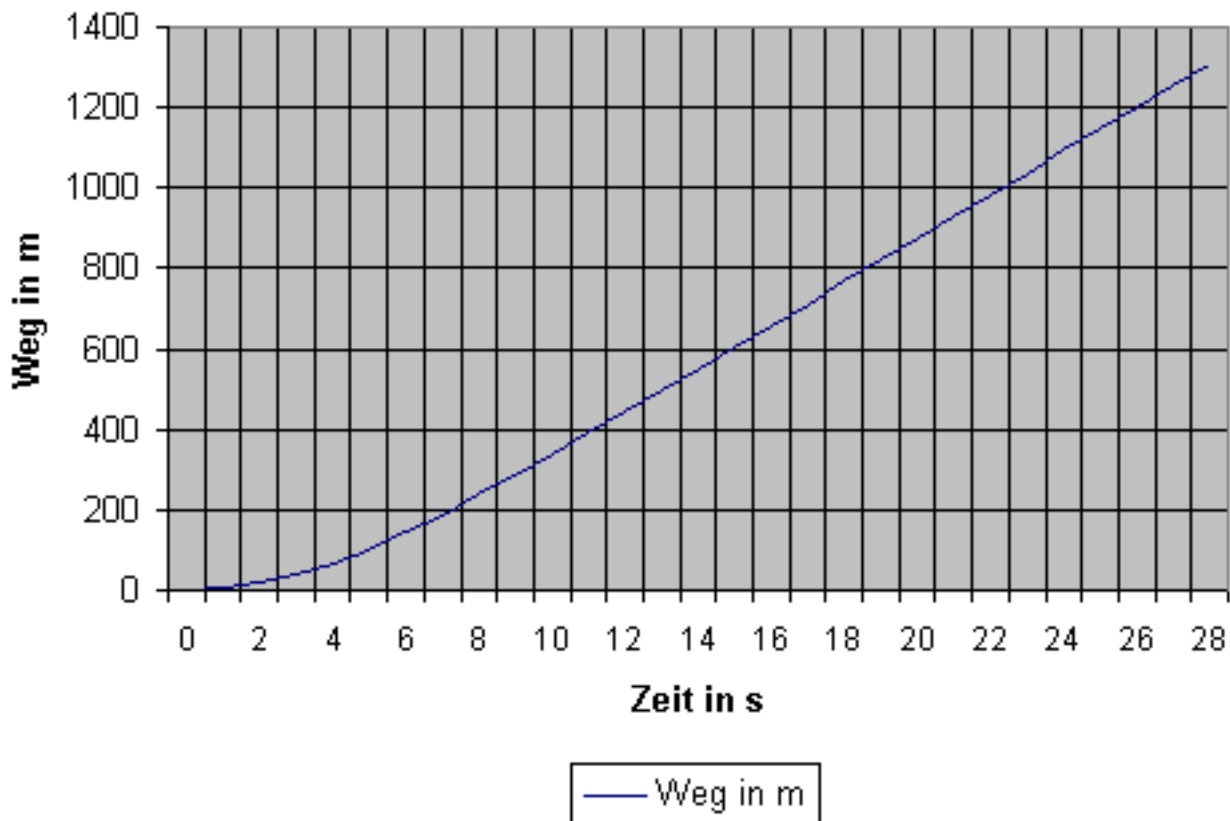
Im Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm sehen wir, dass sich die Geschwindigkeitszunahme verlangsamt, nach etwa 10s ist praktisch die Endgeschwindigkeit erreicht:

## Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm



Die Folge hiervon ist, dass nur anfangs der Weg quadratisch mit der Zeit zunimmt, nach Erreichen der konstanten Endgeschwindigkeit nach etwa 10s aber nur noch linear:

## Weg-Zeit-Diagramm



Das Excel-Arbeitsblatt steht hier zum [Download](#) zur Verfügung.

Aufgrund des Luftwiderstandes werden also Fallschirmspringer während des Falls nicht immer schneller, sondern erreichen nach etwa 10s Fallzeit ihre maximale Geschwindigkeit von etwa 200km/h, denn dann ist die Erdanziehungskraft mit der Luftwiderstandskraft im Gleichgewicht.

Fallschirmspringer müssen ein Sprungbuch führen, in dem alle Sprünge mit allen relevanten Daten aufgezeichnet werden, dazu gehört u.a. die Freifallzeit pro Sprung (und die über alle Sprünge aufsummierte Freifallzeit). Zur einfachen Berechnung wird mit der folgenden Faustformel gerechnet:

- Für die ersten 300m werden 10s benötigt.
- Dann jeweils 1s für 50m.

Bei einer Absprunghöhe von 4000m und einer Öffnungshöhe von 1000m werden 3000m im Fall zurückgelegt. Für die ersten 300m werden 10s benötigt, es verbleiben 2700m. Für diese werden 54s benötigt. Insgesamt ist der "freie" Fall also 64s lang. (Für Zusatzberechtigungen (Fallschirmlehrer, Tandemmaster, usw.) ist u.a. eine bestimmte Gesamt-Freifallzeit erforderlich, in der Regel mindestens 5 Stunden.)

[\[zurück\]](#) [\[Anfang\]](#) [\[Start\]](#) [\[Stichwörter\]](#)

[\[weiter\]](#) [\[Ende\]](#) [\[Home\]](#) [\[Glossar\]](#)

© [Andreas Rittershofer](#) 7.5.1997

Letzte Änderung: 2000-07-15