

Kapitel M

Gewöhnliche Differentialgleichungen

Vincent van Gogh (1853–1890), *La nuit étoilée*, wikimedia.org

Vollversion

• michael-eisermann.de/lehre/HM3

• 26.02.2025

Inhalt dieses Kapitels M

M002

- 1 Erste Beispiele von Differentialgleichungen
 - Einfache Beispiele aus der Mechanik
 - Separierbare Differentialgleichungen
 - Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen
- 2 Exakte Differentialgleichungen
 - Exaktheit und Potential von $f(x, y) + g(x, y) y' = 0$
 - Lösung durch einen integrierenden Faktor
 - Lineare Differentialgleichungen
- 3 Fazit: Existenz, Eindeutigkeit, Lösungsmethoden
 - Zusammenfassung und Verständnisfragen
 - Methodenvergleich: Viele Wege führen zum Ziel.
 - Gut & schlecht gestellte Anfangswertprobleme
- 4 Weitere Aufgaben und Anwendungsbeispiele
 - Umformung und Lösung durch Substitution
 - Exakte Differentialgleichungen und Potentiale
 - Qualitative Analyse, Runden und Eingrenzen

Beispiele gewöhnlicher Differentialgleichungen (kurz DG, engl. ODE):

- 1 Erster Ordnung: $y'(x) = y(x)$
- 2 Zweiter Ordnung: $y''(x) + 4y(x) = 0$
- 3 Dritter Ordnung: $y'''(x)y'(x) - y''(x)^2 + (1 + x^2)y(x)^2 = 0$

Gesucht ist jeweils eine Funktion $y: I \rightarrow \mathbb{R}$ auf einem Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$, deren Ableitungen die geforderte Gleichung für alle $x \in I$ erfüllen.

Wie sehen mögliche Lösungen in diesen Beispielen aus?

- 1 $y(x) = 0$, oder $y(x) = e^x$, allgemein $y(x) = a e^x$ mit $a \in \mathbb{R}$. Probe!
- 2 $\sin(2x)$, $\cos(2x)$, allgemein $y(x) = a \sin(2x) + b \cos(2x)$. Probe!
- 3 Eine mögliche Lösung ist $y(x) = e^{-x^2/2}$. Machen Sie die Probe!

😊 Lösungen sind oft schwer zu finden, aber leicht zu überprüfen.

Jede ernsthafte Rechnung schließt deshalb mit einer Probe durch Einsetzen und Nachrechnen, wenigstens mit Plausibilitätsprüfung!

Wir behandeln die Grundfragen gewöhnlicher Differentialgleichungen: Wie viele Lösungen gibt es? Wie findet man eine? womöglich gar alle?

Differentialgleichungen sind die Sprache der Naturgesetze.

- Oft ist der unabhängige Parameter $x \in \mathbb{R}$ die Zeit.
- Die abhängige Größe $y(x) \in \mathbb{R}^n$ ist der Zustand zur Zeit x .
- Die Gleichung $y'(x) = f(x, y(x))$ ist das Bewegungsgesetz für y .
- Die Anfangsdaten $y(x_0) = y_0$ sind der Startpunkt $(x_0, y_0) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$.

Viele Modelle in Naturwissenschaft und Technik haben diese Form!

Was benötigen Sie zur Lösung von Differentialgleichungen?

- Leistungsstarke Lösungstheorie als verlässliche Grundlage
- Erprobte Rezepte für spezielle Klassen von Gleichungen
- Wie immer Übung und Erfahrung, Geschick und Ausdauer

Trotz allgemeiner Lösungstheorie und -methoden hat jede DG ihre Eigenarten: Wir müssen genau hinschauen und sorgfältig arbeiten!

Zur Sorgfalt gehört, die gefundenen / benachbarte / alle Lösungen zu prüfen, zu skizzieren, zu diskutieren und alle Sonderfälle zu beachten.

📖 Zur Vertiefung und für zahlreiche Anwendungsbeispiele siehe H. Heuser: *Gewöhnliche Differentialgleichungen*, Vieweg, 6. Aufl. 2009

Eine **Differentialgleichung** ist eine Gleichung für eine Funktion $y(x)$, in der auch ihre Ableitungen y', y'', \dots auftreten. Wir unterscheiden:

$y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gewöhnliche Differentialgleichung in $x, y, y', y'' \dots$

$y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ System gewöhnlicher DG in $x, y_1, \dots, y_n, y'_1, \dots, y'_n, \dots$

$y: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ partielle Differentialgleichung in $x_1, \dots, x_m, y, \partial_i y, \dots$

$y: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ System partieller DG in $x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n, \partial_i y_j, \dots$

Dies wird häufig genutzt und ist eine mathematische Grundtechnik aller Naturwissenschaftler:innen und Ingenieur:innen. Prominente Beispiele:

- Dynamik, Newton $\ddot{q} = f(q)$, Hamilton $\dot{q}_i = \partial H / \partial p_i, \dot{p}_i = -\partial H / \partial q_i$.
- Strömung, Cauchy–Riemann $\partial_x u = \partial_y v, \partial_x v = -\partial_y u$. Navier–Stokes.
- Wärmeleitung, Wellen-, Potential-, Maxwell–Gleichungen, uvm.

Zu partiellen Differentialgleichungen kommen wir später ab Kapitel Q.

Es gibt darüber hinaus auch stochastische Differentialgleichungen, in die Zufallsvariablen als Parameter eingehen. Dies wird zum Beispiel in der Finanzmathematik zur Modellierung von Börsenkursen genutzt.

Implizite Differentialgleichungen

Gegeben sei eine stetige Funktion $F: \mathbb{R}^{n+2} \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$. Dies definiert die zugehörige **implizite Differentialgleichung n -ter Ordnung**:

$$F(x, y, y', \dots, y^{(n-1)}, y^{(n)}) = 0$$

Sie heißt algebraisch, analytisch, etc., falls die Funktion F dies ist.

Eine **Lösung** dieser Differentialgleichung auf einem Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$ ist eine n -mal diff'bare Funktion $y: I \rightarrow \mathbb{R}$, sodass für alle $x \in I$ gilt:

$$(x, y(x), y'(x), \dots, y^{(n-1)}(x), y^{(n)}(x)) \in G,$$

$$F(x, y(x), y'(x), \dots, y^{(n-1)}(x), y^{(n)}(x)) = 0.$$

Sind zudem noch **Anfangsdaten** gegeben, also ein Startpunkt

$$(x_0, y_0, y_1, \dots, y_{n-1}, y_n) \in G,$$

so soll die Lösung $y: I \rightarrow \mathbb{R}$ durch diesen Punkt laufen, das heißt

$$x_0 \in I, y(x_0) = y_0, y'(x_0) = y_1, \dots, y^{(n-1)}(x_0) = y_{n-1}, y^{(n)}(x_0) = y_n.$$

Diese Problemstellung heißt implizites **Anfangswertproblem** (AWP).

Kann man die DG nach $y^{(n)}$ auflösen, so erhält man eine **explizite DG**.

Gegeben sei eine stetige Funktion $f : \mathbb{R}^{n+1} \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$. Dies definiert die zugehörige **explizite Differentialgleichung n -ter Ordnung**

$$y^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)})$$

Sie heißt algebraisch, analytisch, etc., falls die Funktion f dies ist. Eine **Lösung** dieser Differentialgleichung auf einem Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$ ist eine n -mal diff'bare Funktion $y : I \rightarrow \mathbb{R}$, sodass für alle $x \in I$ gilt:

$$\begin{aligned} (x, y(x), y'(x), \dots, y^{(n-1)}(x)) &\in G, \\ y^{(n)}(x) &= f(x, y(x), y'(x), \dots, y^{(n-1)}(x)). \end{aligned}$$

Sind zudem noch **Anfangsdaten** gegeben, also ein Startpunkt

$$(x_0, y_0, y_1, \dots, y_{n-1}) \in G,$$

so soll die Lösung $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ durch diesen Punkt laufen, das heißt

$$x_0 \in I, y(x_0) = y_0, y'(x_0) = y_1, \dots, y^{(n-1)}(x_0) = y_{n-1}.$$

Diese Problemstellung heißt explizites **Anfangswertproblem** (AWP).

Differentialgleichungen erster Ordnung

Gegeben sei eine stetige Funktion $f : \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$. Dies definiert die zugehörige **explizite Differentialgleichung erster Ordnung**:

$$y' = f(x, y).$$

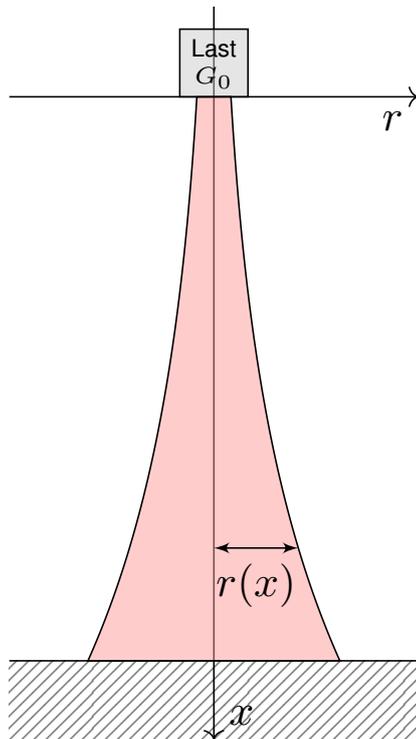
Gesucht sind alle diff'baren Funktionen $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ auf einem (maximalen) Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$, die obige Gleichung erfüllen, d.h. für alle $x \in I$ gilt

$$(x, y(x)) \in G \quad \text{und} \quad y'(x) = f(x, y(x)).$$

Die erste Forderung besagt, dass der Graph von y in G liegt, kurz $y \subseteq G$. Die zweite: In jedem Punkt $(x, y) \in G$ schreibt $f(x, y)$ die Steigung vor. Anders gesagt, die Lösung $x \mapsto (x, y(x))$ verläuft ganz im Gebiet G und erfüllt dort die Bedingung $y' = f(x, y)$. Äquivalente Schreibweisen:

$$\begin{aligned} y' &= f(x, y), & y'(x) &= f(x, y(x)), & \dot{y} &= f(t, y), & \dot{y}(t) &= f(t, y(t)), \\ u' &= f(x, u), & u'(x) &= f(x, u(x)), & \dot{x} &= f(t, x), & \dot{x}(t) &= f(t, x(t)), \quad \dots \end{aligned}$$

 Der Kontext gibt an, was der unabhängige Parameter ist (x, t, \dots) und was die hiervon abhängige, gesuchte Funktion ist (y, u, \dots) .



Der Eiffelturm in Paris am Abend des 14.08.2013, Höhe 324m



Der Burj Khalifa in Dubai, Höhe 830m, Bildquelle: wikimedia

Aufgabe: Konstruieren Sie eine Säule aus einem Material konstanter Dichte ρ , so dass der Druck (Last pro Fläche) überall konstant p ist.

Zahlenbeispiel: Beton $\rho = 3\text{g/cm}^3$, Last $G_0 = 4600\text{kN}$, Radius $r_0 = 1\text{m}$, Höhe 300m .
Unser Modell ist zwar extrem vereinfacht, aber es illustriert doch recht gut das Prinzip.

Lösung: In Höhe x haben wir den Radius $r(x) > 0$ gemäß Skizze. Die Fläche ist $A(x) = \pi r(x)^2$, das Volumen $V(x) = \int_{h=0}^x \pi r(h)^2 dh$, das Gewicht $G(x) = g\rho V(x)$, der Druck $G(x)/A(x) = p$. Insgesamt:

$$g\rho \cdot \int_{h=0}^x \pi r(h)^2 dh \stackrel{!}{=} p \cdot \pi r(x)^2$$

Ableiten dieser Integralgleichung ergibt unsere Differentialgleichung:

$$g\rho \pi r(x)^2 = 2p \pi r(x) r'(x).$$

Diese ist elementar lösbar. Wir trennen die Variablen und integrieren:

$$\frac{r'(x)}{r(x)} = \frac{g\rho}{2p} =: c \Rightarrow \int_{h=0}^x \frac{r'(h)}{r(h)} dh = \int_{h=0}^x c dh \Rightarrow \ln r(x) - \ln r_0 = cx$$

Wir erhalten somit $r(x) = r_0 e^{cx}$. Der Radius wächst exponentiell!

Dank passender mathematischer Werkzeuge gelingt uns die Rechnung erfreulich leicht.

Im Zahlenbeispiel gilt $p \approx 1500\text{kN/m}^2$ und $r(x) = 1\text{m} \cdot e^{x \cdot 0.01/\text{m}}$, also $r(300\text{m}) \approx 20\text{m}$.

Probe / Plausibilität: Die Druckfestigkeit liegt je nach Beton zwischen 10 und 100N/mm^2 .

Unsere Rechnung illustriert das Grundprinzip. Anwendungen berechnet man noch viel genauer!

😊 Abstraktion ist die Kunst, Wichtiges von Unwichtigem zu trennen. Differentialgleichungen nutzen wir zur Formulierung der Naturgesetze, sie sind die universelle Sprache der Naturwissenschaft und der Technik: Damit können wir Probleme formulieren, strukturieren, verstehen, lösen.

1. Grundlegendes Verständnis der vorliegenden Situation:

Um Anwendungen in der Physik, Mechanik, Thermodynamik, Strömungslehre, etc. zu verstehen, benötigen Sie zunächst die erforderlichen Grundkenntnisse der betroffenen Anwendungsgebiete: Naturgesetze, grundlegende Modelle, geeignete Vereinfachungen, etc.

😊 Erst so können Sie die Situation quantitativ und präzise erfassen.

2. Mathematische Modellierung der vorliegenden Situation:

Durch geeignete Vereinfachung, Formalisierung und Abstraktion erhalten Sie ein mathematisches Modell. Dieses besteht aus den relevanten Größen und den zwischen ihnen gelten Beziehungen, meist geeignete Gleichungen, sehr häufig Differentialgleichungen.

😊 Hierzu nutzen Sie die Techniken Ihrer HM und weitere nach Bedarf.

3. Lösung durch geeignete mathematische Werkzeuge: Dazu lernen Sie hier die grundlegenden Rechentechniken. Das ist ein weites Gebiet! Je nach Ihren Anwendungen vertiefen Sie die nötigen Techniken zur numerischen Näherung, zu partiellen Differentialgleichungen, etc.

😊 Lösungen sind oft schwer zu finden, aber leicht zu überprüfen. Zur Sorgfalt gehört, die gefundenen / benachbarte / alle Lösungen zu prüfen, zu diskutieren und umsichtig alle Sonderfälle zu beachten.

4. Anpassung und Überprüfung anhand gegebener Daten:

Ist eine mathematische Lösung oder numerische Näherung gelungen, so passen Sie schließlich die noch freien Parameter des Modells an die gegebenen Daten an und überprüfen soweit möglich die Vorhersagen des Modells durch Experimente, Messungen, Alternativmodelle, etc.

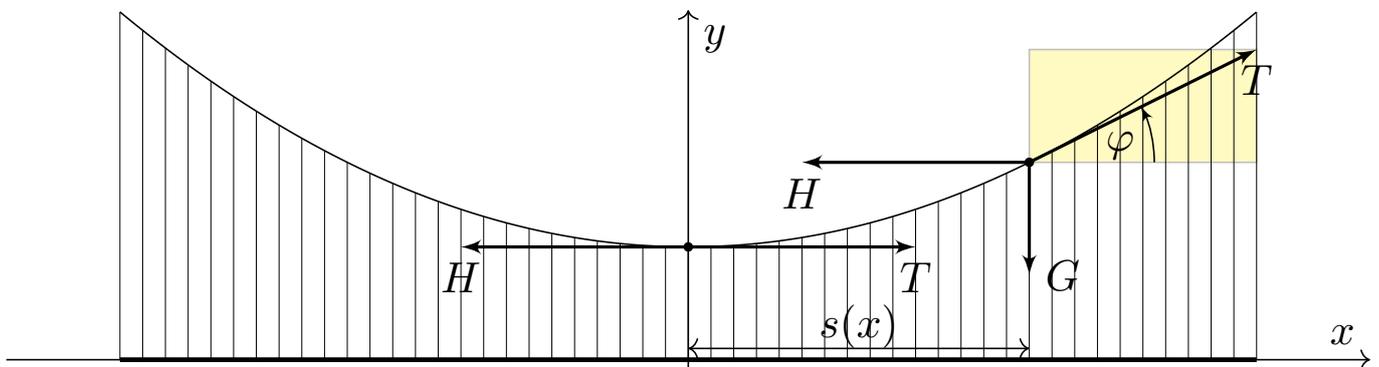
⚠ Falls nötig muss erneut ab (1) ein besseres Modell erstellt werden.

Diese Vorlesung konzentriert sich auf Lösungsmethoden (Schritt 3). Aus Ihren Vorlesungen kennen Sie bereits einige Anwendungen (1,2,4), viele weitere werden noch folgen. Nutzen Sie diese Querverbindungen!



Golden Gate Bridge, San Francisco

Aufgabe: Eine Hängebrücke trägt eine schwere Fahrbahn der Dichte ρ mit leichten Kabeln. Bestimmen Sie deren Verlauf als Funktionsgraph. Wir vernachlässigen das Gewicht der Kabel gegenüber der Fahrbahn.



Lösung: Wir suchen die Funktion $y(x)$. Wie in der Skizze haben wir die Steigung $y'(x) = \tan \varphi(x)$ und die Fahrbahnlänge $s(x) = x - x_0$. In jedem Punkt $(x, y(x))$ des Kabels herrscht **Kräftegleichgewicht**:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ -g\rho s(x) \end{pmatrix}}_{\text{Gewichtskraft, vertikal}} + \underbrace{\begin{pmatrix} -H \\ 0 \end{pmatrix}}_{\text{horizontal}} + \underbrace{\begin{pmatrix} T \cos \varphi(x) \\ T \sin \varphi(x) \end{pmatrix}}_{\text{tangential}} = 0$$

Aus $H = T \cos \varphi(x)$ und $g\rho s(x) = T \sin \varphi(x)$ folgt

$$y'(x) = \tan \varphi(x) = \frac{\sin \varphi(x)}{\cos \varphi(x)} = \frac{g\rho}{H} s(x) = 2a(x - x_0).$$

😊 Als Lösungen dieser DG $y'(x) = 2a(x - x_0)$ finden wir die Parabeln

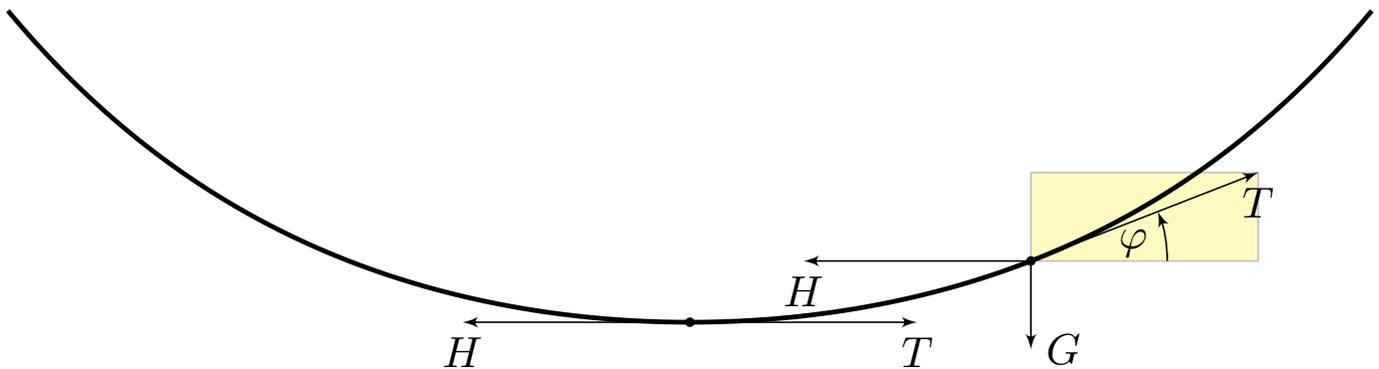
$$y(x) = a(x - x_0)^2 + y_0.$$

Wir brauchen effiziente Methoden zur systematischen Lösung! Machen Sie die Probe! Dies ist tatsächlich die allgemeine Lösung. Die Parameter a, x_0, y_0 passen wir den gegebenen Daten an. Genauere Statik: alle Teile, diskretisieren, lineares Gleichungssystem. Dynamik: Schwingungen, Wind, Erdbeben, etc. Stochastische Last: Wölbung für leer, mittlere und maximale Last.



Indiana Jones and the Temple of Doom

Aufgabe: Eine homogene Kette der Dichte ρ hängt frei und ruhig an ihren Enden. Bestimmen Sie ihren Verlauf als Funktionsgraph.



Lösung: Wir suchen die Funktion $y(x)$. Wie in der Skizze haben wir die Steigung $y'(x) = \tan \varphi(x)$ und Kettenlänge $s(x) = \int_{t=x_0}^x \sqrt{1 + y'(t)^2} dt$. In jedem Punkt $(x, y(x))$ der Kette herrscht **Kräftegleichgewicht**:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ -g\rho s(x) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -H \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T \cos \varphi(x) \\ T \sin \varphi(x) \end{pmatrix} = 0$$

Aus $H = T \cos \varphi(x)$ und $g\rho s(x) = T \sin \varphi(x)$ folgt

$$y'(x) = \tan \varphi(x) = \frac{g\rho}{H} s(x) = a^{-1} \int_{t=x_0}^x \sqrt{1 + y'(t)^2} dt.$$

Ableiten dieser Integralgleichung ergibt die Differentialgleichung

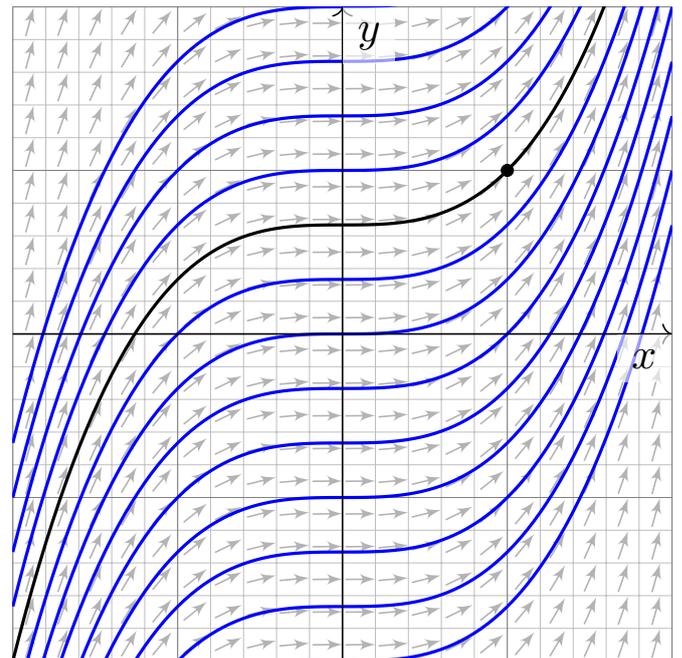
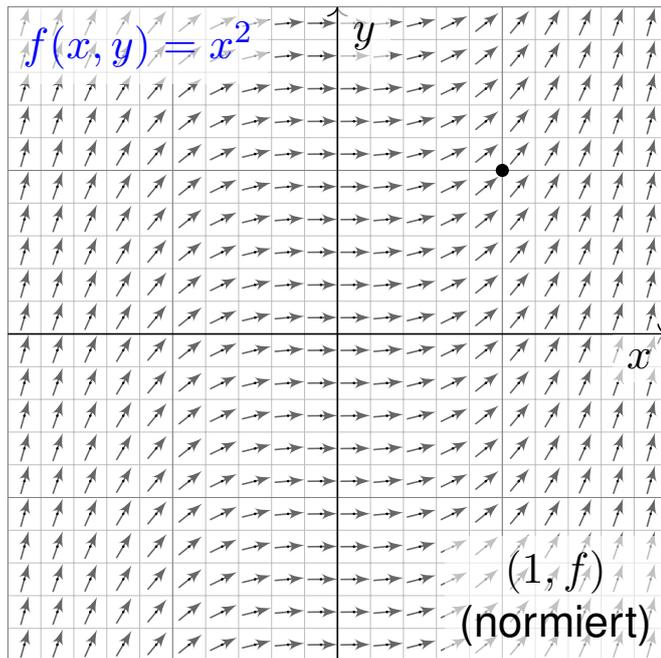
$$y''(x) = a^{-1} \sqrt{1 + y'(x)^2} \quad \text{bzw.} \quad z'(x) = a^{-1} \sqrt{1 + z(x)^2}.$$

😊 Als Lösungen dieser DG finden wir die Hyperbelfunktionen:

$$z(x) = \sinh\left(\frac{x - x_0}{a}\right) \quad \text{also} \quad y(x) = a \cosh\left(\frac{x - x_0}{a}\right) + y_0$$

Wir brauchen effiziente Methoden zur systematischen Lösung! Machen Sie die Probe! Dies ist tatsächlich die allgemeine Lösung. Die Parameter a, x_0, y_0 passen wir den gegebenen Daten an. Für unsere Stift-und-Papier-Rechnung vereinfachen wir stark, gerade das schult unsere Intuition!

Aufgabe: Welche Funktionen $y : \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$ erfüllen $y'(x) = x^2$? zudem $y(1) = 1$? Skizze? Was ist jeweils das maximale Definitionsintervall I ?



Wir skizzieren das Richtungsfeld zu $f(x, y) = x^2$ auf dem Gebiet $G = \mathbb{R}^2$: Lösungskurven $x \mapsto (x, y(x))$ sind tangential zum Vektorfeld $(1, f(x, y))$. Sie erkennen so den qualitativen Verlauf der Lösungen $y(x) = x^3/3 + c$.

Separation der Variablen und Integration

😊 Geometrisch ist dies ein Strömungsfeld: Lassen wir ein Teilchen in diesem Strom schwimmen, so ist seine Trajektorie eine Lösungskurve!

Lösung: Die Variablen sind getrennt. Wir können direkt integrieren:

$$\begin{aligned} y'(x) &= x^2 \\ \implies \int y'(x) dx &= \int x^2 dx + \text{const} \\ \implies y(x) &= x^3/3 + c \quad \text{Probe!} \end{aligned}$$

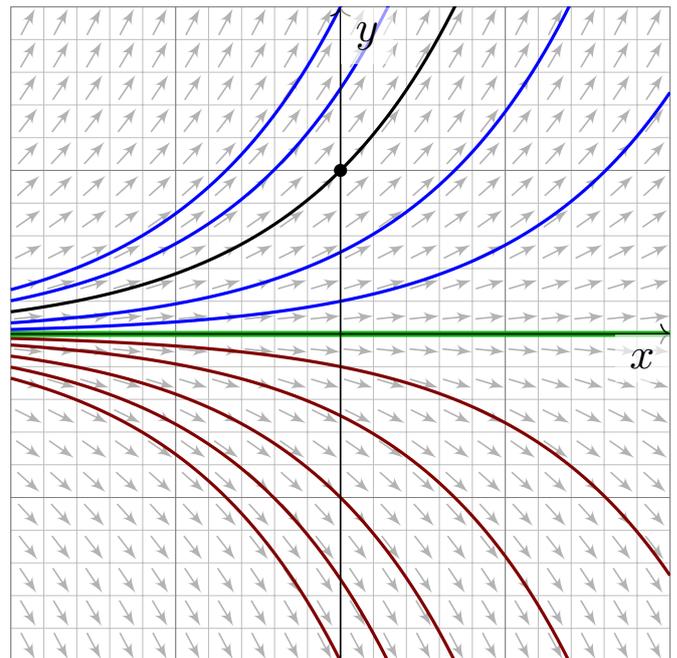
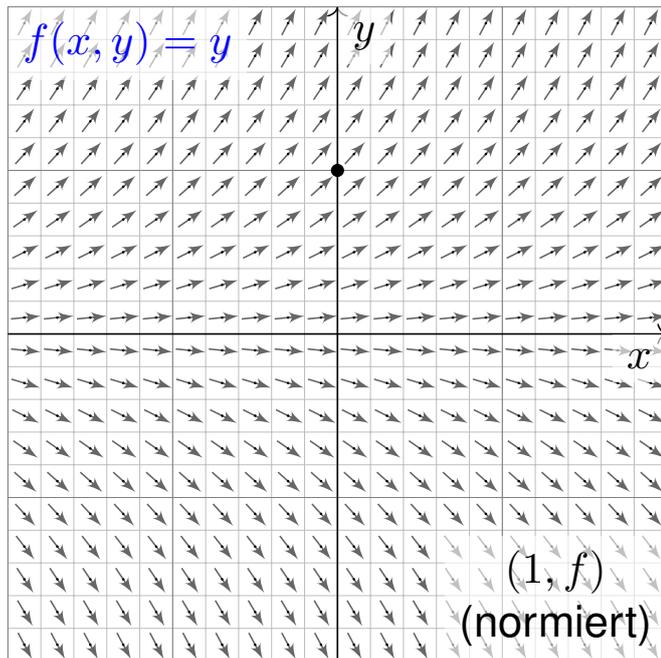
Die Probe ist leicht: Ableiten genügt. . . Es gilt tatsächlich $y'(x) = x^2$. Unsere Rechnung beweist, dass wir alle Lösungen gefunden haben! Die Integrationskonstante $c \in \mathbb{R}$ können wir hierbei frei wählen.

😊 Das AWP $y'(x) = x^2$ mit $y(1) = 1$ wird einzig gelöst durch

$$y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto y(x) = (x^3 + 2)/3.$$

Ist ein beliebiger Anfangswert $y(x_0) = y_0$ vorgegeben, so ist die einzige Lösung $y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto y(x) = (x^3 - x_0^3)/3 + y_0$. Machen Sie die Probe! Jede andere Lösung ist Einschränkung $y|_J$ auf ein Intervall, $1 \in J \subseteq \mathbb{R}$.

Aufgabe: Welche Funktionen $y : \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$ erfüllen $y'(x) = y(x)$? und $y(0) = 1$? Skizze? Was ist jeweils das maximale Definitionsintervall I ?



Wir skizzieren das Richtungsfeld zu $f(x, y) = y$ auf dem Gebiet $G = \mathbb{R}^2$: Lösungskurven $x \mapsto (x, y(x))$ sind tangential zum Vektorfeld $(1, f(x, y))$. Sie erkennen so den qualitativen Verlauf der Lösungen $y(x) = c \cdot e^x$.

Separation der Variablen und Integration

😊 Anders als die ersten drei Aufgaben aus der Mechanik sind diese Aufgaben kontextfrei: Zu lösen ist eine gegebene Gleichung, so einfach.

Lösung: Eine Lösung ist $y(x) = 0$. Für $y > 0$ integrieren wir:

$$\begin{aligned} y'(x) &= y(x) \\ \implies \frac{y'(x)}{y(x)} &= 1 & \implies \int \frac{y'(x)}{y(x)} dx &= \int 1 dx + \text{const} \\ \implies \ln y(x) &= x + \text{const} & \implies y(x) &= c \cdot e^x \quad \text{Probe!} \end{aligned}$$

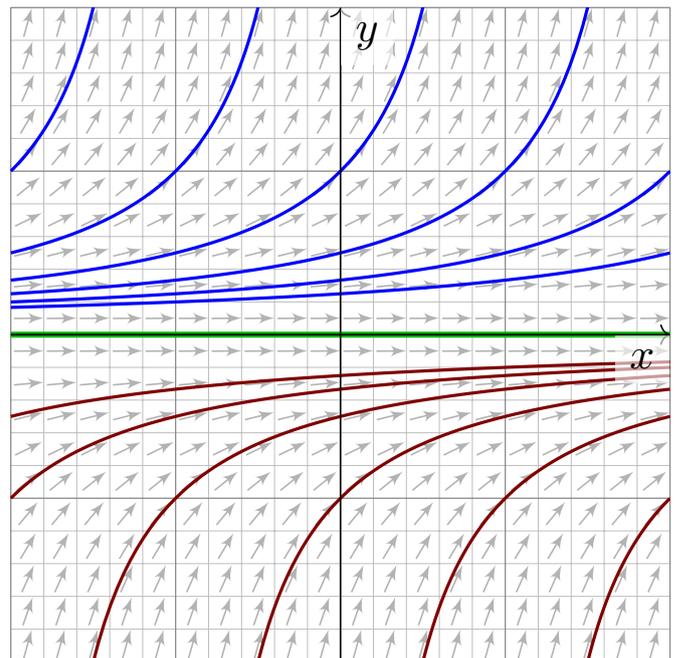
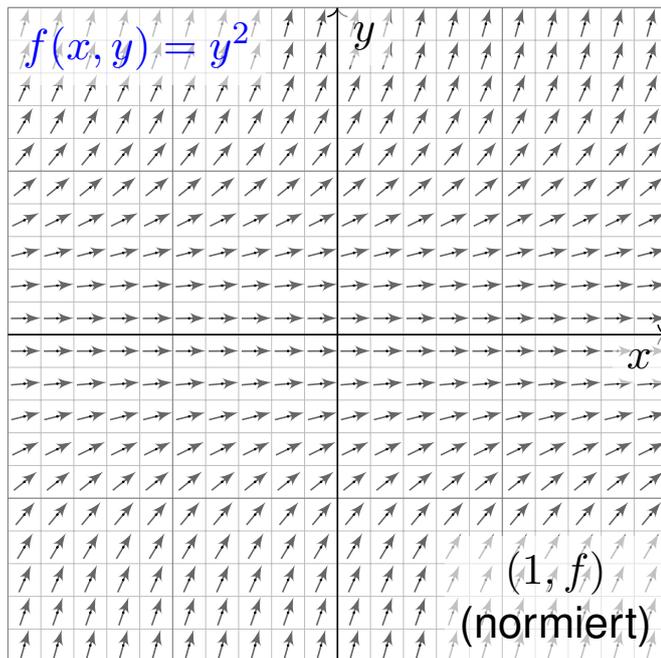
Die Probe ist leicht: Ableiten genügt. . . Es gilt tatsächlich $y'(x) = y(x)$. Die Integrationskonstante $c = e^{\text{const}} > 0$ können wir hierbei frei wählen. Ebenso verfahren wir im Falle $y < 0$ und erhalten $y(x) = c \cdot e^x$ mit $c < 0$. Unsere Rechnung beweist, dass wir alle Lösungen gefunden haben!

😊 Das AWP $y'(x) = y(x)$ mit $y(0) = 1$ wird einzig gelöst durch

$$y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto y(x) = e^x.$$

😊 Ist ein beliebiger Anfangswert $y(x_0) = y_0$ vorgegeben, so ist die einzige Lösung $y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto y(x) = y_0 e^{x-x_0}$. Machen Sie die Probe! Jede andere Lösung ist Einschränkung $y|_J$ auf ein Intervall, $0 \in J \subseteq \mathbb{R}$.

Aufgabe: Welche Funktionen $y: \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$ erfüllen $y'(x) = y(x)^2$? Skizze? Finden Sie zu jeder Lösung das maximale Definitionsintervall I .



Wir skizzieren das Richtungsfeld zu $f(x, y) = y^2$ auf dem Gebiet $G = \mathbb{R}^2$: Lösungskurven $x \mapsto (x, y(x))$ sind tangential zum Vektorfeld $(1, f(x, y))$. Sie erkennen so den qualitativen Verlauf der Lösungen $y(x) = 1/(c - x)$.

Separation der Variablen und Integration

Lösung: Eine Lösung ist $y(x) = 0$. Für $y \neq 0$ integrieren wir:

$$\begin{aligned}
 y'(x) &= y(x)^2 \\
 \implies \frac{y'(x)}{y(x)^2} &= 1 & \implies \int \frac{y'(x)}{y(x)^2} dx &= \int 1 dx + \text{const} \\
 \implies -y(x)^{-1} &= x + \text{const} & \implies y(x) &= \frac{1}{c - x} \quad \text{Probe!}
 \end{aligned}$$

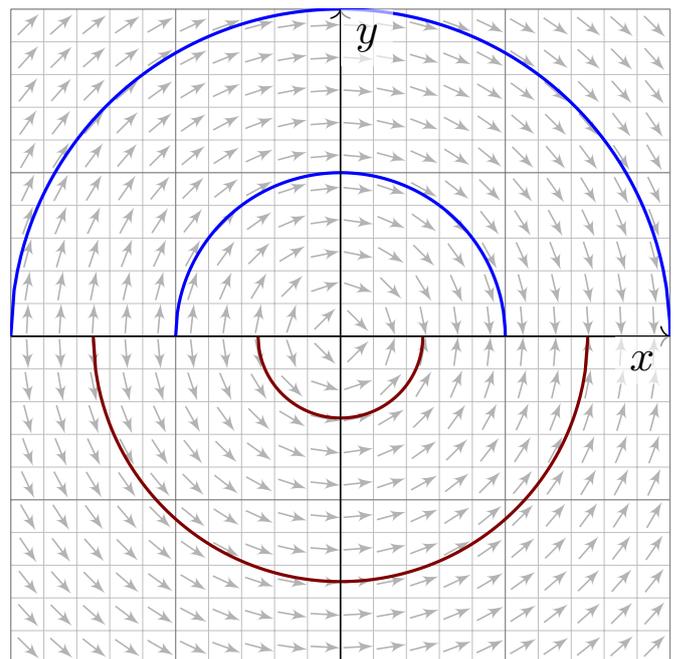
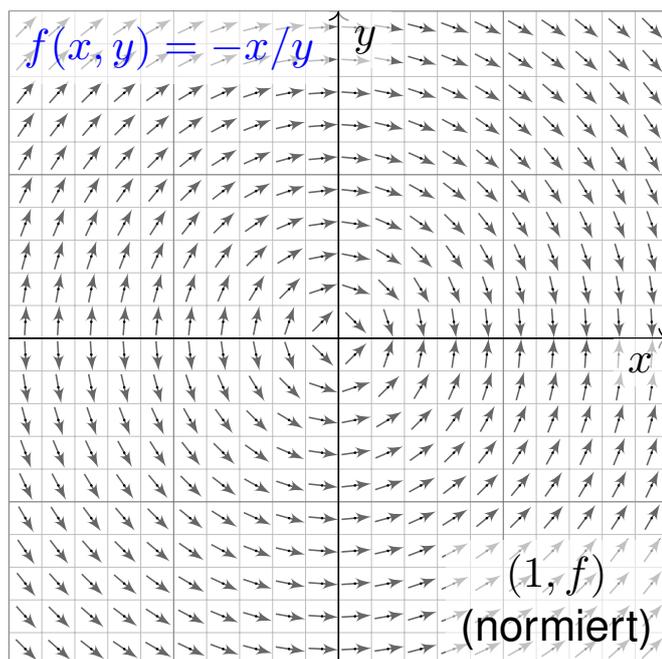
! Polstelle: Jede Lösung „explodiert“. Die beiden Zweige haben zwar dieselbe Formel, aber sonst nichts miteinander zu tun! Wenn dies Ihr physikalisches System beschreibt, dann geht es bei der Polstelle kaputt!

😊 Zu jeder Konstanten $c \in \mathbb{R}$ erhalten wir hier zwei Lösungen:

$$\begin{aligned}
 y_c^+ &:]-\infty, c[\rightarrow \mathbb{R}_{>0} : x \mapsto y_c^+(x) = 1/(c - x), \\
 y_c^- &:]c, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}_{<0} : x \mapsto y_c^-(x) = 1/(c - x).
 \end{aligned}$$

😊 Durch jeden Startpunkt (x_0, y_0) läuft genau eine maximale Lösung, nämlich die Funktion $y: \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto y(x) = y_0 / (1 - (x - x_0)y_0)$ auf dem Definitionsintervall $I = \{x \in \mathbb{R} \mid (x - x_0)y_0 < 1\}$. Probe!

Aufgabe: Welche Funktionen $y: \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$ erfüllen $y'(x) = -x/y(x)$? Skizze? Finden Sie zu jeder Lösung das maximale Definitionsintervall I .



Wir skizzieren hier das Richtungsfeld zu $f(x, y) = -x/y$ auf $G = \mathbb{R} \times \mathbb{R}^*$. Lösungskurven $x \mapsto (x, y(x))$ sind tangential zum Vektorfeld $(1, f(x, y))$. Sie erkennen den qualitativen Verlauf der Lösungen $y(x) = \pm\sqrt{r^2 - x^2}$.

Separation der Variablen und Integration

Lösung: Wir trennen die Variablen und integrieren:

$$y'(x) = -x/y(x)$$

$$\implies y(x) y'(x) = -x \quad \implies \int y(x) y'(x) dx = \int -x dx + c$$

$$\implies y(x)^2/2 = -x^2/2 + c \quad \implies y(x) = \pm\sqrt{r^2 - x^2}$$

Für $c \leq 0$ gibt es keine Lösungen; wir wählen daher $c = r^2/2$, $r \in \mathbb{R}_{>0}$. Zu jedem Radius $r > 0$ beschreibt die Lösung $y_r^+(x) = \sqrt{r^2 - x^2}$ den oberen Halbkreis und entsprechend $y_r^-(x) = -\sqrt{r^2 - x^2}$ den unteren. Die Probe ist leicht: Ableiten genügt. Es gilt tatsächlich $y'(x) = -x/y(x)$. Unsere Rechnung beweist, dass wir alle Lösungen gefunden haben!

😊 Durch jeden Startpunkt $(x_0, y_0 \neq 0)$ läuft genau eine max. Lösung,

$$y:]-r, r[\rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto y(x) = \text{sign}(y_0) \sqrt{r^2 - x^2} \quad \text{mit} \quad r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}.$$

Bemerkenswert: Sie existiert nur auf dem endlichen Intervall $I =]-r, r[$. Hier explodiert nicht $y(x)$, sondern nur die Steigung $y'(x)$ für $x \rightarrow \pm r$.

Aufgabe: Alle bisherigen Beispiele nutzen als Lösungsmethode die **Trennung der Variablen**. Formulieren Sie diese als allgemeine Regel.

Lösung: Eine **separierbare Differentialgleichung** ist von der Form

$$y' = g(x) h(y) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0.$$

Lösungsmethode: Wir trennen die Variablen gemäß $y'/h(y) = g(x)$, wobei wir $h(y) \neq 0$ annehmen müssen, und integrieren anschließend:

$$\int_{t=x_0}^x \frac{y'(t)}{h(y(t))} dt \stackrel{!}{=} \int_{t=x_0}^x g(t) dt =: G(x)$$

Auf der linken Seite substituieren wir $u = y(t)$ und $du = y'(t) dt$:

$$\int_{t=x_0}^x \frac{y'(t)}{h(y(t))} dt = \int_{u=y_0}^y \frac{1}{h(u)} du =: H(y)$$

Somit gilt $H(y(x)) \stackrel{!}{=} G(x)$, und Auflösen ergibt $y(x) = H^{-1}(G(x))$.

😊 Diese Methode fassen wir allgemein im folgenden Satz zusammen.

Separation der Variablen und Integration

Satz M1A: Lösung separierbarer Differentialgleichungen

Zu lösen sei die separierbare Differentialgleichung

$$y' = g(x) h(y) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0.$$

Gegeben sind hierzu stetige Funktionen $g: I \rightarrow \mathbb{R}$ und $h: J \rightarrow \mathbb{R} \setminus \{0\}$ auf Intervallen $I, J \subseteq \mathbb{R}$ sowie die Anfangswerte $x_0 \in I$ und $y_0 \in J$.

Wir definieren Stammfunktionen $G: I \rightarrow \mathbb{R}$ und $H: J \rightarrow \mathbb{R}$ durch

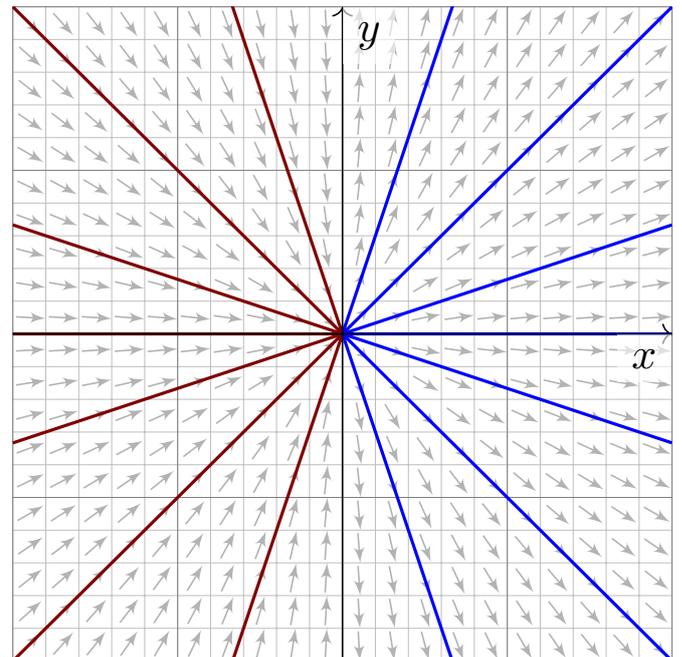
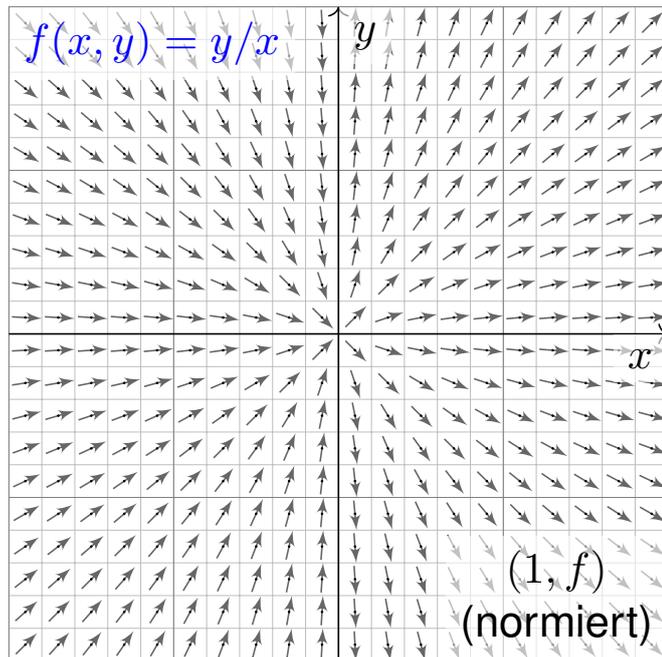
$$G(x) := \int_{t=x_0}^x g(t) dt \quad \text{und} \quad H(y) := \int_{u=y_0}^y \frac{1}{h(u)} du.$$

Die Funktion H ist streng monoton, also bijektiv auf ihr Bild $H(J) \subseteq \mathbb{R}$. Sei $I_0 \subseteq I$ ein hinreichend kleines Intervall um $x_0 \in I_0$ mit $G(I_0) \subseteq H(J)$. Unser AWP erlaubt genau eine Lösung $y: \mathbb{R} \supseteq I_0 \rightarrow J \subseteq \mathbb{R}$, nämlich

$$y(x) = H^{-1}(G(x)).$$

😊 Lösungsformel 😊 Eindeutigkeit 😊 Stetig abhängig von (x_0, y_0)

Aufgabe: Welche Funktionen $y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ erfüllen $x y'(x) = y(x)$?
Wie viele Lösungen laufen durch einen gegebenen Startpunkt (x_0, y_0) ?



Die **implizite DG** $x y' = y$ ist definiert in allen Punkten $(x, y) \in \mathbb{R}^2$.
Auf $G = \mathbb{R}^* \times \mathbb{R}$ ist sie äquivalent zur **expliziten DG** $y' = y/x$.

Separation der Variablen und Integration

Lösung: Wir nehmen zunächst $x, y > 0$ an und trennen die Variablen:

$$\begin{aligned}
 x y'(x) &= y(x) \\
 \implies \frac{y'(x)}{y(x)} &= \frac{1}{x} & \implies \int \frac{y'(x)}{y(x)} dx &= \int \frac{1}{x} dx + \text{const} \\
 \implies \ln y(x) &= \ln x + \text{const} & \implies y(x) &= a \cdot x
 \end{aligned}$$

Unsere Rechnung beweist, dass wir tatsächlich alle Lösungen $y(x) > 0$ für $x > 0$ gefunden haben. Für $x < 0$ oder $y < 0$ verfahren wir ebenso.
Die explizite DG $y'(x) = y(x)/x$ wird gelöst durch die Halbgeraden

$$\begin{aligned}
 y_a^+ : \mathbb{R}_{>0} &\rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto a \cdot x, & a \in \mathbb{R}, \\
 y_b^- : \mathbb{R}_{<0} &\rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto b \cdot x, & b \in \mathbb{R}.
 \end{aligned}$$

Die implizite DG $x y'(x) = y(x)$ wird gelöst durch die Geraden

$$y_c : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto c \cdot x, \quad c \in \mathbb{R}.$$

- 😊 Durch jeden Startpunkt $(x_0 \neq 0, y_0)$ läuft genau eine Lösung y_c .
- ⚠ Durch den Startpunkt $(0, 0)$ laufen unendlich viele Lösungen!
- ⚠ Durch jeden Startpunkt $(0, y_0 \neq 0)$ läuft gar keine Lösung!

Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen

Problem? Bevor wir rechnen, präzisieren wir das Ziel! Probe? Liegt eine vermeintliche Lösung vor, so sind genau diese Eigenschaften zu prüfen!

Definition M1B: explizite DG und Anfangswertproblem

Eine **explizite Differentialgleichung erster Ordnung** hat die Form

$$y'(x) = f(x, y(x)) \quad \text{kurz} \quad y' = f(x, y).$$

Gegeben ist als **rechte Seite** eine stetige Funktion $f: \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$. Eine **Lösung** dieser Differentialgleichung auf einem Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$ ist eine (stetig) differenzierbare Funktion $y: I \rightarrow \mathbb{R}$, die für alle $x \in I$ die Bedingungen $(x, y(x)) \in G$ und $y'(x) = f(x, y(x))$ erfüllt.

Sind zudem **Anfangsdaten** $(x_0, y_0) \in G$ gegeben, so soll die Lösung y durch diesen Punkt laufen, das heißt $x_0 \in I$ und $y(x_0) = y_0$ erfüllen. Ein solches Anfangswertproblem heißt **gut gestellt**, wenn genau eine Lösung y existiert und stetig von den Anfangsdaten (x_0, y_0) abhängt.

Beispiel: Separierbare DG sind gut gestellt dank unseres Satzes M1A.

Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen

Existieren Lösungen? Überblick verschafft uns der grundlegende Satz:

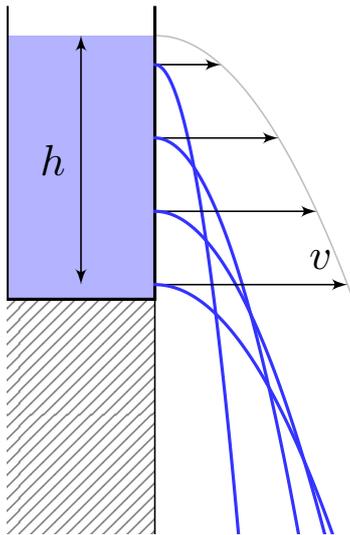
Satz M1c: Cauchy Existenz- und Eindeutigkeitssatz, kurz $\exists \& E$

Sei $f: \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Zu lösen sei die Differentialgleichung

$$y' = f(x, y) \quad \text{mit Anfangswert} \quad y(x_0) = y_0.$$

- (1) Zu jedem Startpunkt $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{G}$ existieren Lösungen $y: \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$. Jede kann beidseitig bis zum Rand ∂G (oder ∞) fortgesetzt werden.
- (2) Ist $f(x, y)$ stetig diff'bar nach y , so ist die Lösung durch $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{G}$ eindeutig bestimmt. Lokal hängt sie stetig differenzierbar von (x_0, y_0) ab.

Wir werden diesen grundlegenden Satz in Kapitel O weiter ausführen und dort auch beweisen. Existenz bedeutet nach M1B: Es gibt ein Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$ um x_0 und eine Funktion $y: I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y(x_0) = y_0$ sowie $(x, y(x)) \in G$ und $y'(x) = f(x, y(x))$ für alle $x \in I$. Jede solche Lösung kann beidseitig fortgesetzt werden bis sie den Rand von G erreicht oder nach ∞ entkommt. Lässt sie sich nicht weiter fortsetzen, so heißt sie maximale Lösung. Folgendes Beispiel zeigt, dass es zu (x_0, y_0) auch mehrere Lösungen geben kann. Das Problem ist dann schlecht gestellt. Eindeutigkeit bedeutet: Sind $u: I \rightarrow \mathbb{R}$ und $v: J \rightarrow \mathbb{R}$ Lösungen mit $u(x_0) = v(x_0) = y_0$, so gilt $u = v$ auf dem gemeinsamen Intervall $I \cap J$. Sind u, v maximal, so gilt zudem $I = J$.



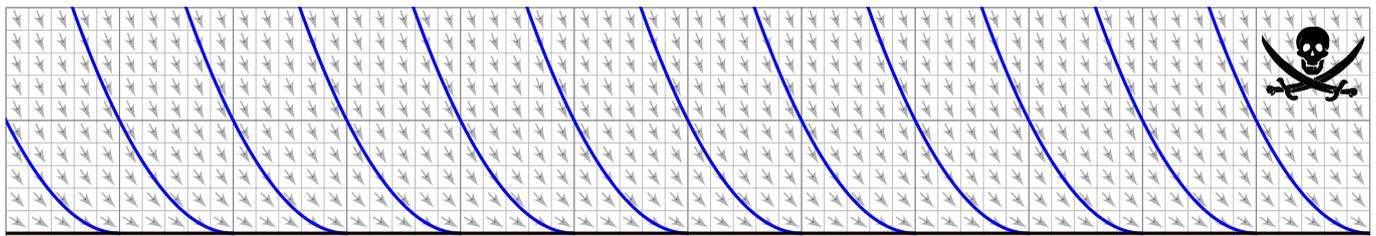
Torricellis Gesetz: Wasser fließt aus einem Zylinder mit der Geschwindigkeit $v = \sqrt{2gh}$. Hierbei ist h die Pegelhöhe, $g = 9.81\text{m/s}^2$ die Erdbeschleunigung, also v die Geschwindigkeit eines Wassertropfens im freien Fall aus Höhe h .

Energiegleichung in der Strömungslehre!

en.wikipedia.org/wiki/Torricelli's_law und /Water_clock: Wie funktioniert eine Wasseruhr? Zeit $t \in \mathbb{R}$, Wasserhöhe $y(t) \geq 0$ über der Öffnung.

Der Pegel y erfüllt **Torricellis Differentialgleichung** $y'(t) = -a\sqrt{y(t)}$. Die Konstante $a > 0$ hängt von der Größe (und Form) der Öffnung ab. In folgender Rechnung nehmen wir zur Vereinfachung $a = 2$ an.

Aufgabe: Welche Funktionen $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ erfüllen $y'(t) = -2\sqrt{y(t)}$? Hier ist $G = \mathbb{R} \times \mathbb{R}_{\geq 0}$ und $f(t, y) = -2\sqrt{y}$. Was sagt der \exists &E-Satz? Welche Anfangswertprobleme $y(t_0) = y_0$ sind hier gut gestellt? Physik will Determinismus; Mathematik bietet Existenz & Eindeutigkeit!



Lösung: Die Nullfunktion $y(t) = 0$ ist eine Lösung. Sei also $y > 0$.

Separation $y'(t) / 2\sqrt{y(t)} = -1$ und Integration zu $\sqrt{y(t)} = c - t \geq 0$.

Wir finden die Lösung $y_c(t) = (c - t)^2$ für $t \leq c$. Für $t > c$ gilt das nicht:

☺ Der Eimer bleibt leer und füllt sich nicht wieder! Maximale Lösung:

$$y_c : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} : t \mapsto y_c(t) = \begin{cases} (c - t)^2 & \text{für } t \leq c, \\ 0 & \text{für } t \geq c. \end{cases}$$

☺ Jedes AWP $y(t_0) = y_0 > 0$ hat genau eine maximale Lösung!

⚠ Jedes AWP $y(t_0) = 0$ hat unendlich viele Lösungen (y_c mit $c \leq t_0$).

Letzteres ist schlecht gestellt. Anschaulich: Ist der Eimer einmal leer, so erkennen wir nicht mehr, wann er auslief! Mathematische Warnung: Für $y > 0$ ist $f(t, y) = -2\sqrt{y}$ stetig nach y diff'bar, für $y = 0$ aber nicht!

Zwecks Illustration beginne ich mit einem sehr einfachen Beispiel.

Aufgabe: Wir betrachten erneut $y'(x) = -x/y(x)$, umgeschrieben zu

$$2x + 2y(x) \cdot y'(x) = 0.$$

Dieser Typ von Differentialgleichung hat die allgemeine Form

$$\begin{pmatrix} f(x, y) \\ g(x, y) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}' = 0 \quad \text{hier mit} \quad \begin{cases} f(x, y) = 2x, \\ g(x, y) = 2y. \end{cases}$$

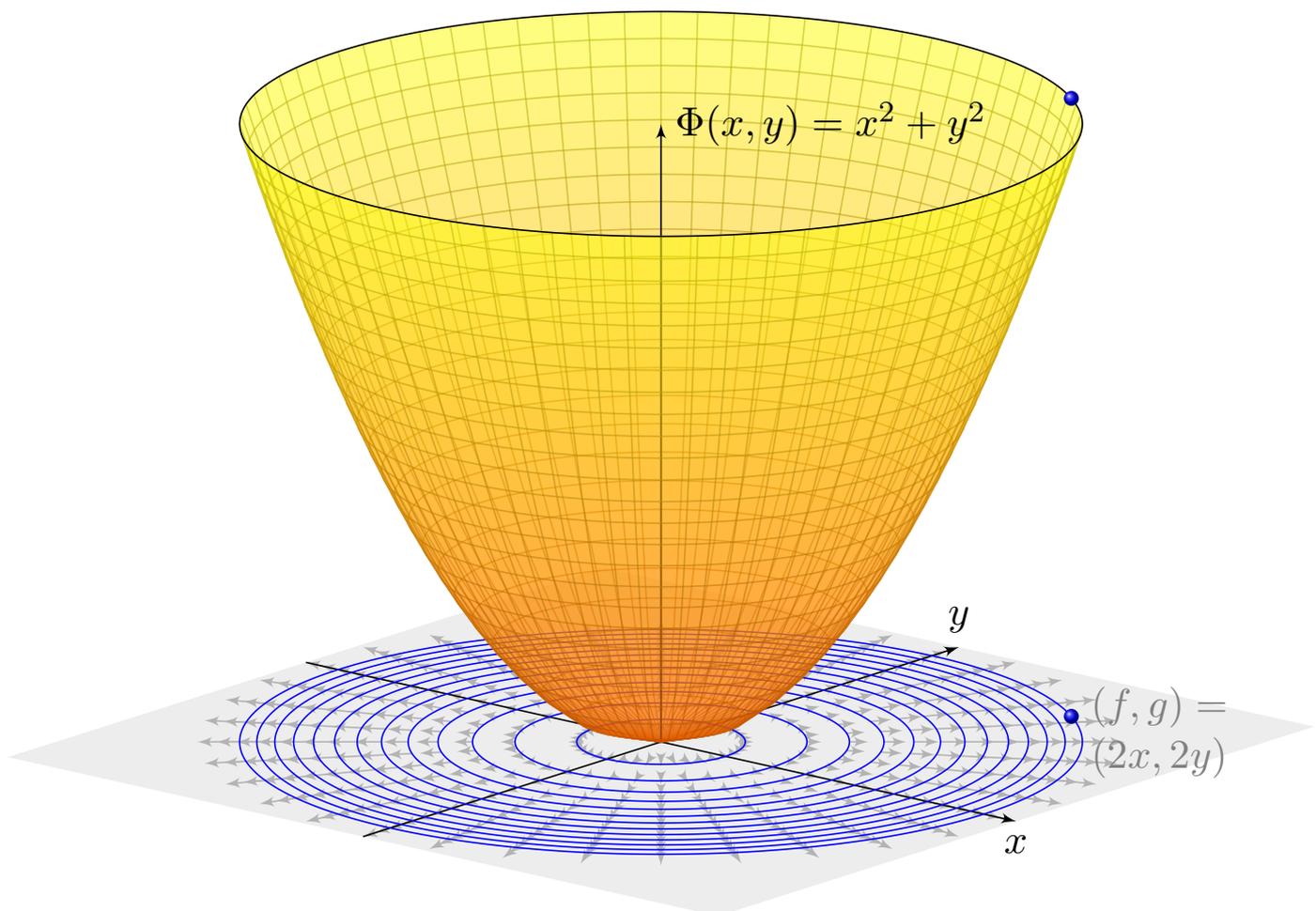
- (1) Wie liegen die Lösungen $x \mapsto (x, y(x))$ zum Vektorfeld (f, g) ?
- (2) Finden und skizzieren Sie ein Potential $\Phi: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ zu (f, g) .
- (3) Gewinnen Sie aus den Niveaulinien von Φ die Lösungen der DG.
- (4) Finden Sie die maximalen Lösungen mit $y(3) = 4$ bzw. $y(1) = -1$.

Lösung: (1) Jede Lösung verläuft senkrecht zum Vektorfeld (f, g) .

(2) Notwendiges Kriterium: Gilt $\text{rot}(f, g) = 0$, also $\partial_y f = \partial_x g$? Ja!

Zudem ist \mathbb{R}^2 einfach zusammenhängend, also existiert ein Potential.

Wir finden $\Phi(x, y) = x^2 + y^2$ (+ const). Probe: $\text{grad } \Phi = (2x, 2y)$.



(3) Die Niveaulinien des Potentials Φ sind Kreise um den Nullpunkt. Diese stehen senkrecht zum radialen Gradientenfeld $\text{grad } \Phi = (f, g)$. Die allgemeinen Lösungen $y(x)$ der DG sind somit Halbkreise: Zu jedem Radius $r > 0$ hat die DG demnach die beiden Lösungen

$$y_r^\pm :]-r, r[\rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto \pm \sqrt{r^2 - x^2}.$$

Probe: Erfüllt diese Funktion tatsächlich $2x + 2y(x) \cdot y'(x) = 0$? Ja! Der folgende Satz versichert uns, dass wir so alle Lösungen finden. Das Definitionsintervall von y_r^\pm haben wir jeweils maximal gewählt.

(4a) Auflösen von $\Phi(x, y(x)) = x^2 + y(x)^2 \stackrel{!}{=} \Phi(3, 4) = 25$ ergibt

$$y(x) = +\sqrt{25 - x^2} \quad \text{für } -5 < x < 5.$$

(4b) Auflösen von $\Phi(x, y(x)) = x^2 + y(x)^2 \stackrel{!}{=} \Phi(1, -1) = 2$ ergibt

$$y(x) = -\sqrt{2 - x^2} \quad \text{für } -\sqrt{2} < x < \sqrt{2}.$$

Die Konstante und das Vorzeichen werden jeweils so bestimmt, dass die Lösung durch den vorgegebenen Punkt $y(3) = 4$ bzw. $y(1) = -1$ läuft.

😊 Das Potential Φ und die Lösungen $x \mapsto (x, y(x))$ sind anschaulich: Analytische Lösung und geometrische Interpretation ergänzen sich! Wir nutzen hierzu die geometrischen Eigenschaften des Gradienten: Der Gradient $\text{grad } \Phi = (f, g)$ zeigt in Richtung des steilsten Anstiegs. In jedem Punkt steht er senkrecht zur Niveaulinie (Äquipotentialkurve).

📖 Zur Wiederholung siehe Stroppel, Höhere Mathematik 2, §4.9.

😊 Die Differentialgleichung $f(x, y) + g(x, y) y' = 0$ bedeutet: Jede Lösung $x \mapsto (x, y(x))$ verläuft senkrecht zum Vektorfeld (f, g) . Der Satz M2A garantiert, dass die Lösungen genau die Niveaulinien von Φ sind, also keine Lösungen hinzukommen oder verloren gehen.

😊 Potential und Lösungen können wir meist gut berechnen! Hier nutzen wir unsere Integralsätze und Techniken aus Kapitel H: Notwendig ist zunächst die Rotationsfreiheit $\text{rot}(f, g) = 0$. Auf einfach zusammenhängenden (z.B. konvexen) Gebieten ist dies hinreichend.

😊 Sind die Voraussetzungen zur Existenz eines Potentials gesichert, so können wir (f, g) zu einem Potential integrieren und die DG lösen!

Die Trennung der Variablen ist nützlich, aber leider nicht immer möglich. Hier hilft das allgemeinere Lösungsverfahren für **exakte DG** weiter: Angenommen $y: \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto y(x)$, erfüllt eine Gleichung

$$\Phi(x, y(x)) = \text{const}$$

für eine Funktion $\Phi: \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$. Für die Ableitung nach x gilt dann

$$\frac{d}{dx} \Phi(x, y(x)) = 0.$$

Sind $\Phi(x, y)$ und $y(x)$ stetig differenzierbar, so gilt dank Kettenregel

$$\partial_x \Phi(x, y(x)) \cdot 1 + \partial_y \Phi(x, y(x)) \cdot y'(x) = 0.$$

Eine Differentialgleichung dieser Form heißt **exakt** mit Potential Φ . Lösungen $x \mapsto (x, y(x))$ sind dann **Äquipotentialkurven** von Φ (M2A).

😊 In Anwendungen verläuft die Rechnung typischerweise umgekehrt: Die Differentialgleichung ist gegeben, wir prüfen Exaktheit, bestimmen ein Potential Φ und lösen schließlich die Gleichung $\Phi(x, y) = c$ nach y . Meist wird ein Anfangswert (x_0, y_0) vorgeben und somit $c = \Phi(x_0, y_0)$.

Exakte Differentialgleichungen: die Methode

M206

Satz M2A: Lösung exakter Differentialgleichung

Jedes stetige Vektorfeld $(f, g): \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}^2$, G offen, definiert eine DG

$$f(x, y) + g(x, y) y' = 0.$$

Diese DG heißt **exakt**, wenn ein Potential Φ zu (f, g) existiert, also eine C^1 -Funktion $\Phi: \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\text{grad } \Phi = (f, g)$, d.h. $\partial_x \Phi = f$, $\partial_y \Phi = g$. Die Lösungen der DG sind dann die Äquipotentialkurven von Φ :

- (1) Eine differenzierbare Funktion $y: \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$ ist genau dann Lösung der Differentialgleichung, wenn $\Phi(x, y(x)) = \text{const}$ für alle $x \in I$ gilt.
- (2) Zu jedem Punkt $(x_0, y_0) \in G$ mit $g(x_0, y_0) \neq 0$ existiert ein offenes Intervall I um x_0 und genau eine Lösung $y: I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y(x_0) = y_0$.

😊 Implizite Lösung 😊 Eindeutigkeit 😊 Stetig abhängig von (x_0, y_0)
 😊 Explizit: Wir können $\Phi(x, y(x)) = c := \Phi(x_0, y_0)$ nach $y(x)$ auflösen, zumindest lokal falls $g(x_0, y_0) \neq 0$ dank Satz über implizite Funktionen. Wie leicht die explizite Auflösung gelingt, hängt vom Einzelfall ab.

Aufgabe: Rechnen Sie die Äquivalenz (1) nach, also „ \Rightarrow “ und „ \Leftarrow “.

Lösung: (1a) Die Implikation „ \Leftarrow “ besagt, dass jede Äquipotentialkurve y mit $\Phi(x, y(x)) = \text{const}$ die DG löst. Dank Kettenregel gilt wie gesehen:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{d}{dx} \Phi(x, y(x)) = \partial_x \Phi(x, y(x)) \cdot 1 + \partial_y \Phi(x, y(x)) \cdot y'(x) \\ &= f(x, y(x)) + g(x, y(x)) y'(x) \end{aligned}$$

(1b) Die Implikation „ \Rightarrow “ besagt, dass jede Lösung $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ der DG eine Äquipotentialkurve von Φ ist. Für $a, b \in I$ gilt nämlich dank HDI:

$$\begin{aligned} \Phi(b, y(b)) - \Phi(a, y(a)) &= \int_{x=a}^b \frac{d}{dx} [\Phi(x, y(x))] dx \\ &= \int_{x=a}^b f(x, y(x)) + g(x, y(x)) y'(x) dx = \int_{x=a}^b 0 dx = 0. \end{aligned}$$

😊 Demnach sind die Lösungskurven $x \mapsto y(x)$ genau die Niveaulinien! Dank (2) ist das Niveau tatsächlich eine *Linie* (und kein *Plateau* o.ä.): Wir erhalten die eindeutige Lösung y durch Auflösen von $\Phi(x, y) = c$.

Wie löst man exakte Differentialgleichungen?

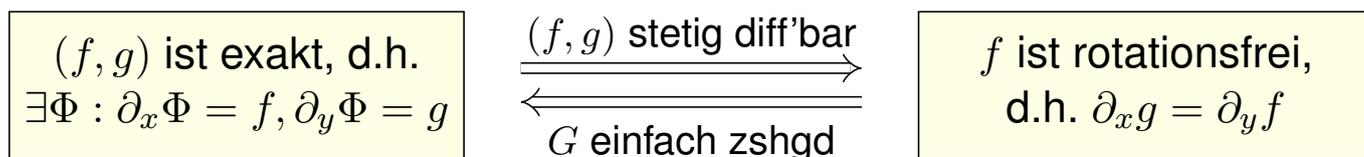
Seien $f, g : \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Die Differentialgleichung

$$f(x, y) + g(x, y) y' = 0$$

ist genau dann exakt, wenn das zugehörige Vektorfeld

$$\begin{pmatrix} f \\ g \end{pmatrix} : \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}^2 : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} f(x, y) \\ g(x, y) \end{pmatrix}$$

exakt ist, also ein Potential $\Phi : G \rightarrow \mathbb{R}$ besitzt. Zur Erinnerung (H2E):



😊 Ein Potential $\Phi(x, y) = \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} (f, g) \cdot d\gamma$ konstruieren wir durch das Arbeitsintegral: wegunabhängig da $\text{rot}(f, g) = 0$ und G einfach zshgd. Zur praktischen Berechnung eignet sich koordinatenweise Integration.

😊 Bei der Anwendung auf DG muss G notfalls eingeschränkt werden, z.B. ein kleines Rechteck um (x_0, y_0) , damit G einfach zshgd wird (E3D).

Was ist ein integrierender Faktor?

Unser Ziel und Slogan: Was noch nicht exakt ist, wird exakt gemacht!
Sei $(f, g) : \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}^2$ stetig. Zu lösen sei die Differentialgleichung

$$f(x, y) + g(x, y) y' = 0.$$

😊 Mit einem Potential Φ zu (f, g) können wir diese DG lösen, wie zuvor.
Wenn nicht? Multiplikation mit $\lambda \neq 0$ ergibt die äquivalente Gleichung

$$\lambda(x, y) f(x, y) + \lambda(x, y) g(x, y) y' = 0.$$

Diese beiden Differentialgleichungen haben genau dieselben Lösungen!
Anschaulich: Die Richtung von (f, g) bleibt, nur die Länge wird skaliert.
Falls (f, g) selbst schon ein Potential hat, dann genügt der Faktor $\lambda = 1$.
Andernfalls wollen wir (f, g) umformen, um eine exakte DG zu erhalten:

Definition M2B: integrierender Faktor

Eine Funktion $\lambda : G \rightarrow \mathbb{R} \setminus \{0\}$ heißt **integrierender Faktor** zu (f, g) ,
wenn das skalierte Vektorfeld $(\lambda f, \lambda g) : G \rightarrow \mathbb{R}^2$ ein Potential hat.

Integrierender Faktor: ein einfaches Beispiel

Aufgabe: Wir betrachten das Vektorfeld $(f, g) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ mit

$$\begin{pmatrix} f \\ g \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x^2 y^3 + y \\ x^3 y^2 - x \end{pmatrix}.$$

Existiert ein Potential? Ist $\lambda(x, y) = (xy)^{-1}$ ein integrierender Faktor?

Lösung: (1) Wir prüfen als erstes die Rotation:

$$\text{rot}(f, g) = \partial_x g - \partial_y f = (3x^2 y^2 - 1) - (3x^2 y^2 + 1) = -2 \neq 0$$

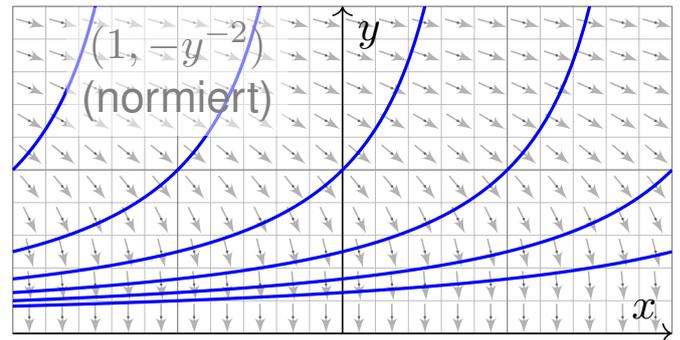
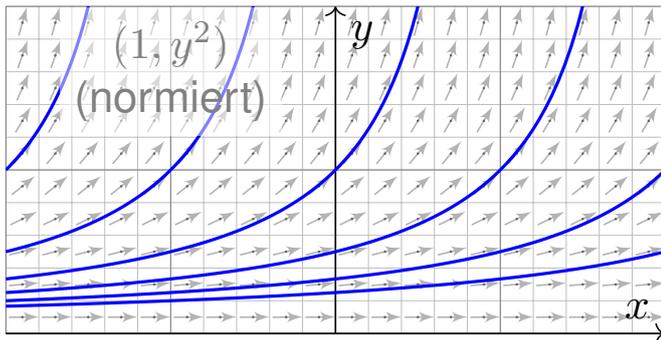
Das Vektorfeld (f, g) erlaubt demnach kein Potential.

(2) Multiplikation mit $\lambda(x, y) = (xy)^{-1}$ skaliert unser Vektorfeld zu

$$\begin{pmatrix} \lambda f \\ \lambda g \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x y^2 + 1/x \\ x^2 y - 1/y \end{pmatrix}, \quad \text{rot}(\lambda f, \lambda g) = 2xy - 2xy = 0.$$

⚠ Hierzu müssen wir das Gebiet \mathbb{R}^2 auf $x, y \neq 0$ einschränken!
Auf diesem ist $\lambda(x, y) = (xy)^{-1}$ ein integrierender Faktor für (f, g) .
Als Potential finden wir $\Phi(x, y) = x^2 y^2 / 2 + \ln|x| - \ln|y|$ für $x, y \neq 0$.

Beispiel: Wir können $y' = y^2$ umschreiben zu $1 - y'/y^2 = 0$.
Wir gelangen so von einer separierbaren zu einer exakten DG!



Aufgabe: Auf einem Rechteck $G = I \times J \subseteq \mathbb{R}^2$ betrachten wir die DG

$$(1) \quad y' = g(x) h(y) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0.$$

Diese können wir äquivalent umwandeln zu

$$(2) \quad g(x) h(y) - y' = 0 \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0.$$

Ist diese DG exakt? Ist $\lambda(x, y) = 1/h(y)$ ein integrierender Faktor?
Lösen Sie so (2). Vergleichen Sie mit der Separationsmethode für (1).

Lösung: Das Vektorfeld $(g(x)h(y), -1)$ ist i.A. nicht exakt, denn

$$\partial_y [g(x)h(y)] = g(x)h'(y) \neq \partial_x [-1] = 0.$$

Durch Multiplikation mit $\lambda(x, y) = 1/h(y)$ erhalten wir eine exakte DG:

$$g(x) + \frac{-1}{h(y)} y' = 0, \quad \text{denn} \quad \partial_y [g(x)] = \partial_x \left[\frac{-1}{h(y)} \right] = 0.$$

Als Potential findet wir $\Phi(x, y) = G(x) - H(y)$ mit

$$G(x) := \int_{t=x_0}^x g(t) dt \quad \text{und} \quad H(y) := \int_{u=y_0}^y \frac{1}{h(u)} du.$$

😊 Auflösen von $G(x) - H(y) = 0$ liefert $y(x) = H^{-1}(G(x))$ wie zuvor.
In diesem Spezialfall erhalten wir erneut die Separationsmethode M1A.

😊 Jede separierbare DG lässt sich so in eine exakte DG umformen.
Wie zuvor müssen wir hierzu $h(y) \neq 0$ für alle $y \in J$ voraussetzen.

😊 Umgekehrt ist nicht jede exakte DG auch separierbar. M215 M316
Exakte DG erweitern daher wesentlich unseren Werkzeugkasten!

Wie berechnet man einen integrierenden Faktor?

Bedingung für einen integrierenden Faktor zum Vektorfeld (f, g) :

$$\partial_y [\lambda(x, y) f(x, y)] = \partial_x [\lambda(x, y) g(x, y)]$$

☹ Dies ist eine partielle Differentialgleichung für $\lambda(x, y)$:

$$(\partial_y \lambda) f + \lambda (\partial_y f) = (\partial_x \lambda) g + \lambda (\partial_x g)$$

Leider gibt es keine allgemeine Methode zur Lösung dieser Gleichung.

😊 In wichtigen Spezialfällen gibt es jedoch integrierende Faktoren, die nur von einer Variablen abhängen, also nur von x oder nur von y .

Aufgabe: Lösen Sie diese Gleichung für $\lambda = \lambda(x)$, also $\partial_y \lambda = 0$.

Lösung: Die obige Gleichung vereinfacht sich für $\lambda(x)$ zu:

$$\lambda(x) \partial_y f(x, y) = \lambda'(x) g(x, y) + \lambda(x) \partial_x g(x, y)$$

Wir lösen nach λ auf und erhalten folgende gewöhnliche DG:

$$\frac{\lambda'(x)}{\lambda(x)} = \frac{\partial_y f(x, y) - \partial_x g(x, y)}{g(x, y)} = -\frac{\text{rot}(f, g)}{g}(x, y)$$

😊 Dies ist lösbar, wenn auch die rechte Seite nur von x abhängt!

Integrierende Faktoren in nur einer Variablen

Satz M2c: integrierende Faktoren in nur einer Variablen

Für jeden nur von x abhängigen integrierenden Faktor $\lambda = \lambda(x)$ gilt:

$$\frac{\lambda'(x)}{\lambda(x)} = \frac{\partial_y f(x, y) - \partial_x g(x, y)}{g(x, y)}, \quad \text{kurz: } \frac{\lambda'(x)}{\lambda(x)} = -\frac{\text{rot}(f, g)}{g}(x, y)$$

Für jeden nur von y abhängigen integrierenden Faktor $\lambda = \lambda(y)$ gilt:

$$\frac{\lambda'(y)}{\lambda(y)} = \frac{\partial_x g(x, y) - \partial_y f(x, y)}{f(x, y)}, \quad \text{kurz: } \frac{\lambda'(y)}{\lambda(y)} = +\frac{\text{rot}(f, g)}{f}(x, y)$$

Dies ist lösbar, wenn auch die rechte Seite nur von x bzw. y abhängt.

Ob eine dieser Lösungen möglich ist, muss man ausprobieren. Die Vorgehensweise ist wie folgt: Auf einem einfach-zusammenhängenden Gebiet G ist das Vektorfeld (f, g) genau dann exakt, wenn $\text{rot}(f, g) = 0$ gilt. Diese sehr einfache Bedingung wird man deshalb als erstes prüfen. Ist $\text{rot}(f, g) \neq 0$, so kann man hoffen, dass die Rotation wie oben formuliert ein Vielfaches von g oder von f ist. Dann greifen obige Kriterien: Wir können einen integrierenden Faktor λ berechnen, das Vektorfeld durch λ korrigieren und schließlich zu einem Potential integrieren.

Aufgabe: Lösen Sie für $x > 0$ die Differentialgleichung

$$[1 - x^2y(x)] + [x^2y(x) - x^3] y'(x) = 0.$$

(1) Ist sie separierbar? (2) exakt? (3) Existiert ein integrierender Faktor?
 (4) Finden Sie ein Potential und (5) damit alle Lösungskurven $x \mapsto y(x)$.

Lösung: (1) Separierbar? $f(x, y) = \frac{x^2y-1}{x^2y-x^3} \stackrel{?}{=} g(x) h(y)$: Nein! Beweis?

Es gilt $f(1, 3)f(2, 4) = \frac{2}{2} \cdot \frac{15}{8} = \frac{15}{8}$, aber $f(1, 4)f(2, 3) = \frac{3}{3} \cdot \frac{11}{4} = \frac{11}{4}$. M316

(2) Exakt? Hier ist $f(x, y) = 1 - x^2y$ und $g(x, y) = x^2y - x^3$, also

$$\text{rot}(f, g) = \partial_x g - \partial_y f = (2xy - 3x^2) + x^2 = 2xy - 2x^2 \neq 0$$

Die DG ist demnach leider nicht exakt. Glücklicherweise gilt jedoch

$$-\frac{\text{rot}(f, g)}{g} = -\frac{2xy - 2x^2}{x^2y - x^3} = -\frac{2x(y - x)}{x^2(y - x)} = -\frac{2}{x}.$$

(3) Daher gibt es einen nur von x abhängigen integrierenden Faktor:

$$\frac{\lambda'(x)}{\lambda(x)} = -\frac{2}{x} \quad \Rightarrow \quad \ln|\lambda(x)| = -2 \ln|x| + \text{const} \quad \Rightarrow \quad \lambda(x) = c x^{-2}$$

Die Konstante c ist für den Multiplikator unerheblich. Wir setzen $c = 1$.

(4) Wir berechnen ein Potential zum reskalierten Vektorfeld

$$\begin{pmatrix} \lambda f \\ \lambda g \end{pmatrix} : \mathbb{R}_{>0} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2 : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x^{-2} - y \\ y - x \end{pmatrix}.$$

Nun gilt $\text{rot}(\lambda f, \lambda g) = 0$. Probe! Wir integrieren koordinatenweise:

$$\partial_x \Phi(x, y) \stackrel{!}{=} x^{-2} - y \quad \Rightarrow \quad \Phi(x, y) = \int x^{-2} - y \, dx = -x^{-1} - xy + c(y).$$

$$\partial_y \Phi(x, y) = -x + c'(y) \stackrel{!}{=} y - x \quad \Rightarrow \quad c(y) = \int y \, dy = y^2/2 + \text{const}$$

Wir finden so das Potential $\Phi(x, y) = y^2/2 - xy - 1/x$. Probe!

(5) Die Lösungskurven $x \mapsto y(x)$ der DG sind die Niveaulinien von Φ :

$$y(x)^2/2 - x y(x) - 1/x = c.$$

Auflösen nach y ergibt $y(x) = x \pm \sqrt{x^2 + 2/x + 2c}$. Die Probe ist leicht!

Zu lösen sei die **homogene lineare Differentialgleichung**

$$y'(x) = a(x) y(x).$$

Hierbei ist $a : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig auf einem Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$ sowie $x_0 \in I$.

Aufgabe: Bestimmen Sie die Menge L aller Lösungen $y : I \rightarrow \mathbb{R}$. Ist L ein reeller Untervektorraum in $C(I, \mathbb{R})$? Welcher Dimension?

Lösung: Die Nullfunktion $y = 0$ löst $y'(x) = a(x) y(x)$.

Wir nehmen $y(x) \neq 0$ an, sodass wir durch $y(x)$ dividieren können:

Separation $y'(x)/y(x) = a(x)$ und Integration zu $\ln|y(x)| = A(x) + C$ liefert $|y(x)| = e^{A(x)+C}$ also $y(x) = \pm e^C e^{A(x)}$ mit der Stammfunktion

$$A : I \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto A(x) := \int_{t=x_0}^x a(t) dt$$

Wir erhalten somit alle Lösungen $y_c(x) = c e^{A(x)}$ mit $c \in \mathbb{R}$. Probe!

😊 Diese Lösungsformel gilt für $c > 0$ und $c < 0$ ebenso wie für $c = 0$.

Ist unsere Lösungsmenge $L = \{ y_c = c e^A \mid c \in \mathbb{R} \}$ bereits vollständig? Wir nutzen den Eindeutigkeitsatz M1c oder rechnen es direkt nach:

Angenommen, irgendeine Funktion $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ erfüllt $y'(x) = a(x) y(x)$. Wir betrachten den Quotienten $q(x) = y(x)/y_1(x)$ und leiten ab:

$$q'(x) = \frac{y'(x)y_1(x) - y(x)y_1'(x)}{y_1(x)^2} = \frac{a(x)y(x) \cdot y_1(x) - y(x) \cdot a(x)y_1(x)}{y_1(x)^2} = 0$$

Auf dem Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$ folgt aus $q' = 0$, dass die Funktion q konstant ist. Demnach gilt $y = c y_1 = y_c$. Wir kennen also tatsächlich *alle* Lösungen!

😊 Alle Lösungen sind Vielfache der Fundamentallösung $e^{A(x)}$.

Anders gesagt, die Lösungsmenge $\{ y_c : I \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto c e^{A(x)} \mid c \in \mathbb{R} \}$ ist hier ein reeller Vektorraum der Dimension 1 mit Basis $y_1(x) = e^{A(x)}$.

😊 Die lineare Struktur ist später für DG n -ter Ordnung sehr nützlich: In diesem Fall ist die Lösungsmenge ein Vektorraum der Dimension n . Die Konstruktion einer Basis, also eines „Fundamentalsystems“ von Lösungen der DG, gestaltet die Rechnung besonders übersichtlich.

Da lineare Differentialgleichungen häufig vorkommen, halten wir fest:

Satz M2D: Lösungsformel für homogene lineare DG

Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall, $a : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, $x_0 \in I$ und $y_0 \in \mathbb{R}$. Zu lösen ist

$$y'(x) = a(x) y(x) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0.$$

Es existiert genau eine Lösung $y : I \rightarrow \mathbb{R}$, und diese ist gegeben durch

$$y(x) = e^{A(x)} y_0 \quad \text{mit} \quad A(x) = \int_{t=x_0}^x a(t) dt.$$

- 😊 Lösungsformel 😊 Eindeutigkeit 😊 Stetig abhängig von (x_0, y_0)
- 😊 Die Lösungsmenge $L_0 = \{ e^A y_0 \mid y_0 \in \mathbb{R} \}$ ist ein 1-dim. Vektorraum!
Das heißt: Linearkombinationen von Lösungen sind wieder Lösungen.
Die Zuordnung $\mathbb{R} \rightarrow L_0 : y_0 \mapsto e^A y_0$ ist ein Vektorraumisomorphismus.
- 😊 Die gesamte Lösungsmenge wird damit besonders übersichtlich und wesentlich einfacher zu beschreiben als bei nicht-linearen Problemen!

Aufgabe: Welche der folgenden DG sind (homogen) linear?

$$y' = y, \quad y' = y/x, \quad y' = -xy, \quad y' = xy, \quad y' = x, \quad y' = x^2, \quad y' = y^2.$$

Für lineare finde man alle Lösungen und die spezielle durch (x_0, y_0) .
Ist auch für die nicht-linearen die Lösungsmenge ein Vektorraum?

Lösung: Unter den bisher diskutierten DG sind folgende linear:

Lineare DG	\Rightarrow allgemeine Lösung,	AWP zu (x_0, y_0)
$y' = y$	$\Rightarrow y(x) = c \cdot e^x,$	$y(x) = y_0 \cdot e^{(x-x_0)}$
$y' = y/x$	$\Rightarrow y(x) = c \cdot x,$	$y(x) = y_0 \cdot x/x_0$
$y' = -xy$	$\Rightarrow y(x) = c \cdot e^{-x^2/2},$	$y(x) = y_0 \cdot e^{(x_0^2-x^2)/2}$
$y' = xy$	$\Rightarrow y(x) = c \cdot e^{x^2/2},$	$y(x) = y_0 \cdot e^{(x^2-x_0^2)/2}$

Hingegen sind die DG $y' = x$ oder $y' = x^2$ oder $y' = y^2$ nicht linear.
Wir kennen hierzu die Lösungsmengen: sie bilden keinen Vektorraum!

Lineare Differentialgleichung: inhomogen

Aufgabe: Lösen Sie die **inhomogene lineare Differentialgleichung**

$$y'(x) = a(x)y(x) + b(x) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0.$$

Lösung: (0) Direkt integrierbar? Nur für $a = 0$. Im Folgenden sei $a \neq 0$.

(1) Separierbar? Nur für $b = ka$ mit $k \in \mathbb{R}$. (2) Exakt? Leider auch nicht:

$$\underbrace{-a(x)y - b(x)}_{f(x,y)} + \underbrace{1}_{g(x,y)} y' = 0 \quad \implies \quad \text{rot}(f, g) = \partial_x g - \partial_y f = a \neq 0$$

(3) Integrierender Faktor? Löse $\lambda'(x)/\lambda(x) = -\text{rot}(f, g)/g = -a(x)$!

Integration ergibt $A(x) = \int_{t=x_0}^x a(t) dt$ und $\lambda(x) = e^{-A(x)} > 0$. Also:

$$- [e^{-A(x)} a(x) y(x) + e^{-A(x)} b(x)] + [e^{-A(x)}] y'(x) = 0$$

Diese DG ist exakt. (Probe!) Hierzu finden wir das Potential

$$\Phi(x, y) = e^{-A(x)} y - \int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt. \quad (\text{Probe!})$$

Auflösen der Gleichung $\Phi(x, y) = \Phi(x_0, y_0) = y_0$ nach y liefert

$$y(x) = e^{A(x)} \int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt + e^{A(x)} y_0. \quad (\text{Probe!})$$

Lineare Differentialgleichung: inhomogen

Satz M2E: Lösungsformel für lineare DG 1. Ordnung

Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall, $a, b: I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, sowie $x_0 \in I$ und $y_0 \in \mathbb{R}$.

Die homogene DG $y'(x) = a(x)y(x)$ mit $y(x_0) = y_0$ wird gelöst durch $y_1(x) = e^{A(x)} y_0$ mit $A(x) = \int_{x_0}^x a(t) dt$. Zur inhomogenen Gleichung

$$y'(x) = a(x)y(x) + b(x) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0$$

existiert genau eine Lösung $y: I \rightarrow \mathbb{R}$, und diese ist gegeben durch

$$y(x) = e^{A(x)} \int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt + e^{A(x)} y_0.$$

- 😊 Lösungsformel 😊 Eindeutigkeit 😊 Stetig abhängig von (x_0, y_0)
- 😊 Für $a = 0$ ist's der HDI. 😊 Für $b = 0$ entfällt der inhomogene Term.
- 😊 Die Lösungsmenge $L_b = \{ y_b + e^A y_0 \mid y_0 \in \mathbb{R} \}$ ist ein affiner Raum.
„Allgemeine Lösungen = partikuläre Lösung + homogene Lösungen“.
- 😊 Diese Lösungsformel gilt allgemein für lineare DGSysteme (O3D).

Aufgabe: Lösen Sie für $x > 0$ die Differentialgleichung

$$y' = y/x + x^3 \quad \text{mit} \quad y(1) = y_0.$$

Lösung: Diese DG ist linear mit $a(x) = 1/x$ und $b(x) = x^3$.

$$A(x) = \int_{t=1}^x a(t) dt = \int_{t=1}^x \frac{1}{t} dt = \left[\ln t \right]_{t=1}^x = \ln x.$$

Der integrierende Faktor ist $e^{-A(x)} = 1/x$. Damit finden wir:

$$\int_{t=1}^x e^{-A(t)} b(t) dt = \int_{t=1}^x t^{-1} \cdot t^3 dt = \int_{t=1}^x t^2 dt = \left[\frac{t^3}{3} \right]_{t=1}^x = \frac{x^3}{3} - \frac{1}{3}$$

Als Lösung unserer Differentialgleichung gewinnen wir schließlich:

$$y(x) = e^{A(x)} \int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt + e^{A(x)} y_0 = \underbrace{\frac{x^4 - x}{3}}_{\text{partikuläre Lösung}} + \underbrace{x y_0}_{\text{homogene Lösung}}$$

😊 Die Probe ist leicht! Sorgfältig einsetzen und ableiten...
Vergleichen Sie dies mit der obigen homogenen DG $y' = y/x$.

Aufgabe: Lösen Sie die Differentialgleichung

$$y' = -xy + x^3 \quad \text{mit} \quad y(0) = y_0.$$

Lösung: Diese DG ist linear mit $a(x) = -x$ und $b(x) = x^3$.

$$A(x) = \int_{t=0}^x a(t) dt = \int_{t=0}^x -t dt = \left[-\frac{t^2}{2} \right]_{t=0}^x = -\frac{x^2}{2}$$

Der integrierende Faktor ist $e^{-A(x)} = e^{x^2/2}$. Damit finden wir:

$$\int_{t=0}^x e^{-A(t)} b(t) dt = \int_{t=0}^x e^{t^2/2} t^3 dt \quad \text{Subs} \begin{cases} u = t^2/2, \\ du = t dt \end{cases}$$

$$\stackrel{\text{Subs}}{=} \int_{u=0}^{x^2/2} e^u \cdot 2u du \stackrel{\text{part}}{=} \left[e^u (2u - 2) \right]_{u=0}^{x^2/2} = e^{x^2/2} (x^2 - 2) + 2$$

Als Lösung unserer Differentialgleichung gewinnen wir schließlich:

$$y(x) = e^{A(x)} \int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt + e^{A(x)} y_0 = \underbrace{x^2 - 2 + 2e^{-x^2/2}}_{\text{partikuläre Lösung}} + \underbrace{e^{-x^2/2} y_0}_{\text{homogene Lösung}}$$

😊 Die Probe ist leicht! Sorgfältig einsetzen und ableiten...

Sei $f: \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Zu lösen sei die **Differentialgleichung**

$$y'(x) = f(x, y(x)) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0.$$

Qualitativer Überblick dank **Existenz- und Eindeigkeitssatz** M1c:

(1) Im Inneren $\overset{\circ}{G}$ existieren Lösungen und laufen bis zum Rand ∂G .

(2) Ist f stetig diff'bar nach y , so ist die Lösung durch $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{G}$ eindeutig bestimmt und hängt stetig von diesen Anfangswerten ab.

Elementar lösen können wir vor allem **exakte Differentialgleichungen**:

- $f(x, y) + g(x, y) y' = 0$ ist exakt, wenn $(f, g) = \text{grad } \Phi$. M206

Wichtige **Spezialfälle** hiervon sind:

- $y' = f(x)$ durch Integration dank HDI. B123
- $y' = g(x) h(y)$ durch Trennung der Variablen. M118
- $y' = a(x) y + b(x)$ lineare DG, explizite Lösungsformel. M222

Durch **Substitution** hierauf zurückführbar sind:

- $y' = f(ax + by + c)$ mit Substitution $v = ax + by + c$. M409
- $y' = f(y/x)$ Ähnlichkeits-DG, mit Substitution $v = y/x$. M411
- $y' = a(x) y + b(x) y^n$ Bernoulli–DG, mit Substitution $v = y^{1-n}$. M413

Existenz, Eindeutigkeit, Lösungsmethoden

Kapitel M präsentiert die wichtigsten Lösungsmethoden für gewöhnliche eindimensionale Differentialgleichungen sowie Anwendungsbeispiele.

Zahlreiche Aufgaben üben, illustrieren und vertiefen diese Techniken.

Das ist für Differentialgleichungen unentbehrlich: Üben, üben, üben!

Eine Lösung zu finden ist schwer, sie zu überprüfen ist meist leicht.

Deshalb sollen Sie am Ende jeder Rechnung die Probe machen!

Trotz allgemeiner Lösungstheorie und -methoden hat jede DG ihre Eigenarten: Man muss genau hinschauen und sorgfältig arbeiten!

Insbesondere ist zu klären und bei jeder Rechnung zu beachten, auf welchem Gebiet $G \subseteq \mathbb{R}^2$ die DG definiert und Lösungen gesucht sind.

Bei allen Umformungen ist sicherzustellen oder nachträglich zu prüfen, dass keine fiktiven Lösungen hinzukommen oder echte verloren gehen.

Zur Sorgfalt gehört, die gefundenen / benachbarte / alle Lösungen zu prüfen, zu skizzieren, zu diskutieren und alle Sonderfälle zu beachten.

 Zur Vertiefung und für zahlreiche Anwendungsbeispiele siehe H. Heuser: *Gewöhnliche Differentialgleichungen*, Vieweg, 6. Aufl. 2009

Aufgabe: Begründen Sie durch ein Ergebnis Ihrer Vorlesung oder widerlegen Sie durch ein Gegenbeispiel aus Ihrem Fundus:

- (1) Sei $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Zu jedem Startpunkt $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ existiert ein Intervall $[x_0, x_1]$ mit $x_1 > x_0$ und eine Funktion $y: [x_0, x_1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y(x_0) = y_0$ und $y'(x) = f(x, y(x))$ für alle $x \in [x_0, x_1]$.
- (2) Sei $f: [x_0, x_1] \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und $y_0 \in \mathbb{R}$. Dann existiert eine Lösung $y: [x_0, x_1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y(x_0) = y_0$ und $y'(x) = f(x, y(x))$ für alle $x \in [x_0, x_1]$.
- (3) Sei $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Für je zwei Funktionen $y, \tilde{y}: [x_0, x_1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y(x_0) = \tilde{y}(x_0) = y_0$ sowie $y'(x) = f(x, y(x))$ und $\tilde{y}'(x) = f(x, \tilde{y}(x))$ für alle $x \in [x_0, x_1]$ gilt Gleichheit $y(x) = \tilde{y}(x)$ für alle $x \in [x_0, x_1]$.
- (4) Sei $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und nach y stetig differenzierbar. Für je zwei Lösungen wie in (3) gilt Gleichheit $y(x) = \tilde{y}(x)$ für alle $x \in [x_0, x_1]$.
- (5) Ist jede separierbare DG exakt? bis auf integrierenden Faktor?
- (6) Ist jede lineare DG exakt? bis auf einen integrierenden Faktor?
- (7) Ist jede exakte DG separierbar? Ist jede exakte DG linear?
Nennen Sie eine exakte DG, die weder separierbar noch linear ist.

- Lösung:** (1) Ja, das ist die Existenzaussage des \exists &E-Satzes M1c.
- (2) Nein, wir können das Lösungsintervall $[x_0, x_1]$ nicht vorschreiben: Die Lösung y startet in $y(x_0) = y_0$, kann aber noch vor Erreichen von x_1 an den Rand gelangen [M115](#) oder nach Unendlich entkommen [M113](#).
- (3) Nein, die Stetigkeit der rechten Seite f allein reicht hierzu nicht. Ein anschauliches Gegenbeispiel ist Torricellis Wasseruhr $y' = \sqrt{|y|}$ [M123](#); ganz ähnlich ist $y' = \sqrt[3]{y(x)^2}$ [M325](#) und allgemein $y' = |y|^\alpha$ [O233](#).
- (4) Ja, das ist die Eindeutigkeitsaussage des \exists &E-Satzes M1c.
- (5) Die separierbare DG $y' = g(x)h(y)$ schreiben wir $g(x)h(y) - y' = 0$. In dieser Form ist sie exakt nur für $g(x) = 0$ oder $h'(y) = 0$. Sie wird exakt durch Multiplikation mit dem integrierenden Faktor $1/h(y)$. [M211](#)
- (6) Die lineare DG $y' = a(x)y + b(x)$ schreiben wir $a(x)y + b(x) - y' = 0$. In dieser Form ist sie exakt nur für $a(x) = 0$. Sie wird exakt durch Multiplikation mit dem integrierenden Faktor $e^{-A(x)}$ mit $A' = a$. [M221](#)
- (7) Nicht jede exakte DG ist separierbar, ebenso ist nicht jede linear. Beispiele sind leicht zu konstruieren: $x + y^2 + 2xyy' = 0$ für $x, y > 0$ ist exakt, aber $y' = 1/2(y/x + 1/y)$ ist weder linear noch separierbar. [M316](#)

Satz M1A erklärt die Lösung **separierbarer Differentialgleichungen**:

$$y' = g(x) h(y) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0$$

Gegeben sind hierzu stetige Funktionen $g: I \rightarrow \mathbb{R}$ und $h: J \rightarrow \mathbb{R} \setminus \{0\}$ auf Intervallen $I, J \subseteq \mathbb{R}$ sowie Anfangswerte $x_0 \in I$ und $y_0 \in J$.

Wir definieren Stammfunktionen $G: I \rightarrow \mathbb{R}$ und $H: J \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$G(x) := \int_{t=x_0}^x g(t) dt \quad \text{und} \quad H(y) := \int_{u=y_0}^y \frac{1}{h(u)} du.$$

Die Funktion H ist streng monoton, also bijektiv auf ihr Bild $H(J) \subseteq \mathbb{R}$. Sei $I_0 \subseteq I$ ein hinreichend kleines Intervall um $x_0 \in I_0$ mit $G(I_0) \subseteq H(J)$. Das AWP erlaubt genau eine Lösung $y: \mathbb{R} \supseteq I_0 \rightarrow J \subseteq \mathbb{R}$, nämlich

$$y(x) = H^{-1}(G(x)).$$

- 😊 Lösungsformel 😊 Eindeutigkeit 😊 Stetig abhängig von (x_0, y_0)
- 😊 Die Probe ist leicht! Einsetzen und sorgfältig nachrechnen...

Satz M2E erklärt die Lösungsformel für **lineare DG erster Ordnung**:

$$y'(x) = a(x) y(x) + b(x) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0$$

Hierzu sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall, $a, b: I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, $x_0 \in I$ und $y_0 \in \mathbb{R}$.

Die homogene DG $y'(x) = a(x)y(x)$ mit $y(x_0) = y_0$ wird gelöst durch $y_1(x) = e^{A(x)} y_0$ mit $A(x) = \int_{x_0}^x a(t) dt$. Zur inhomogenen Gleichung existiert genau eine Lösung $y: I \rightarrow \mathbb{R}$, und diese ist gegeben durch

$$y(x) = e^{A(x)} \int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt + e^{A(x)} y_0.$$

- 😊 Lösungsformel 😊 Eindeutigkeit 😊 Stetig abhängig von (x_0, y_0)
- 😊 Für $a = 0$ ist's der HDI. 😊 Für $b = 0$ entfällt der inhomogene Term.
- 😊 Die Lösungsmenge $\{ y_b + e^A y_0 \mid y_0 \in \mathbb{R} \}$ ist ein affiner Raum.
„Allgemeine Lösungen = partikuläre Lösung + homogene Lösungen“.
- 😊 Diese Lösungsformel gilt allgemein für lineare DGSysteme (O3D).
- 😊 Die Probe ist leicht! Einsetzen und sorgfältig nachrechnen...

Jedes stetige Vektorfeld $(f, g) : \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}^2$, G offen, definiert eine DG

$$f(x, y) + g(x, y) y' = 0.$$

Diese DG heißt **exakt**, wenn ein Potential Φ zu (f, g) existiert, also eine C^1 -Funktion $\Phi : \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\text{grad } \Phi = (f, g)$, d.h. $\partial_x \Phi = f$, $\partial_y \Phi = g$.

Satz M2A erklärt die Lösungskurven exakter Differentialgleichung:

Die Lösungen $x \mapsto (x, y(x))$ der DG sind Äquipotentialkurven von Φ .

(1) Eine differenzierbare Funktion $y : \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$ ist genau dann Lösung der Differentialgleichung, wenn $\Phi(x, y(x)) = \text{const}$ für alle $x \in I$ gilt.

(2) Zu jedem Punkt $(x_0, y_0) \in G$ mit $g(x_0, y_0) \neq 0$ existiert ein offenes Intervall I um x_0 und eine eindeutige Lösung $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y(x_0) = y_0$.

😊 Implizite Lösung 😊 Eindeutigkeit 😊 Stetig abhängig von (x_0, y_0)

😊 Explizit: Wir können $\Phi(x, y(x)) = c := \Phi(x_0, y_0)$ nach $y(x)$ auflösen, zumindest lokal falls $g(x_0, y_0) \neq 0$ dank Satz über implizite Funktionen. Wie leicht die explizite Auflösung gelingt, hängt vom Einzelfall ab.

Integrierende Faktoren

Eine Funktion $\lambda : G \rightarrow \mathbb{R} \setminus \{0\}$ heißt **integrierender Faktor** zu (f, g) , wenn das skalierte Vektorfeld $(\lambda f, \lambda g) : G \rightarrow \mathbb{R}^2$ ein Potential hat.

Beispiele: Separierbar $\lambda(y) = 1/h(y)$ [M211], linear $\lambda(x) = e^{-A(x)}$ [M221].

Satz M2c erklärt integrierende Faktoren in nur einer Variablen:

Für jeden nur von x abhängigen integrierenden Faktor $\lambda = \lambda(x)$ gilt:

$$\frac{\lambda'(x)}{\lambda(x)} = \frac{\partial_y f(x, y) - \partial_x g(x, y)}{g(x, y)}, \quad \text{kurz: } \frac{\lambda'(x)}{\lambda(x)} = -\frac{\text{rot}(f, g)}{g}(x, y)$$

Für jeden nur von y abhängigen integrierenden Faktor $\lambda = \lambda(y)$ gilt:

$$\frac{\lambda'(y)}{\lambda(y)} = \frac{\partial_x g(x, y) - \partial_y f(x, y)}{f(x, y)}, \quad \text{kurz: } \frac{\lambda'(y)}{\lambda(y)} = +\frac{\text{rot}(f, g)}{f}(x, y)$$

Dies ist lösbar, wenn auch die rechte Seite nur von x bzw. y abhängt. Ob eine dieser Lösungen möglich ist, muss man jeweils ausprobieren.

😊 Vorgehensweise: Man prüft zunächst $\text{rot}(f, g) = 0$. Falls möglich, berechnet man ein Potential Φ zu (f, g) , notfalls nur lokal um (x_0, y_0) . Andernfalls versucht man einen der beiden obigen Korrekturfaktoren λ .

Aufgabe: Wir untersuchen erneut (nach M119) die Differentialgleichung

$$y(x) - x \cdot y'(x) = 0.$$

Diese DG ist besonders einfach, an ihr testen wir all unsere Methoden.

- (1) Ist diese Differentialgleichung separierbar? Ist sie exakt?
- (2) Wird die DG exakt durch den Faktor $\lambda(x, y) = (xy)^{-1}$?
Finden und skizzieren Sie ein Potential für $x > 0$ und $y > 0$.
- (3) Finden Sie alle Lösungen der Differentialgleichung.
Finden Sie die maximale Lösung zum Anfangswert $y(1) = \pi$.
- (4) Welche Anfangswertprobleme (x_0, y_0) sind hier gut gestellt?
Hängt die Lösung stetig von den Anfangswerten (x_0, y_0) ab?
- (5) Ist die DG $y' = y/x$ linear? Was ergibt die Lösungsformel?
Gibt es einen int. Faktor, der nur von x abhängt? nur von y ?
- (6) Wird die DG exakt durch den Faktor $\lambda(x, y) = 1/(x^2 + y^2)$?
Finden und skizzieren Sie ein Potential! Auf welchem Gebiet geht das?

Lösung: (1) Diese DG ist separierbar. Wir können sie durch Trennung der Variablen integrieren, siehe M119. Sie ist jedoch nicht exakt:

$$\underbrace{(+y)}_{f(x, y)} + \underbrace{(-x)}_{g(x, y)} y'(x) = 0 \quad \implies \quad \text{rot}(f, g) = \partial_x g - \partial_y f = -2 \neq 0$$

(2) Die äquivalente DG $1/x - y'/y = 0$ ist exakt!

Wir finden das Potential $\Phi(x, y) = \ln x - \ln y = \ln(x/y)$ für $x, y > 0$.

Lösungskurven $\ln(x/y) = \text{const}$, also $y(x) = cx$ für $x, c > 0$. Probe!

(3) Die explizite DG $y'(x) = y(x)/x$ wird gelöst durch die Halbgeraden $y_c^+ : \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto c \cdot x$, sowie $y_c^- : \mathbb{R}_{<0} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto c \cdot x$ mit $c \in \mathbb{R}$.

Die implizite DG $x y'(x) = y(x)$ wird gelöst durch die Geraden $y_c : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, y(x) = c \cdot x$. Durch $(1, \pi)$ läuft die Lösung $y(x) = \pi x$.

(4) Durch jeden Startpunkt $(x_0 \neq 0, y_0)$ läuft genau eine Lösung y_c , nämlich die mit $c = y_0/x_0$, und diese hängt stetig von (x_0, y_0) ab.
Durch den Startpunkt $(0, 0)$ laufen unendlich viele Lösungen!
Durch den Startpunkt $(0, y_0 \neq 0)$ läuft gar keine Lösung!

(5) Die DG $y' = y/x$ ist linear mit $a(x) = 1/x$ und $b(x) = 0$. Lösung:

$$y(x) = y(1) e^{A(x)} \quad \text{mit} \quad A(x) = \int_{t=1}^x a(t) dt = \ln x \quad \text{also} \quad y(x) = cx.$$

Dies entspricht den Lösungen aus (2), fortgesetzt wie in (3).

Der int. Faktor $e^{-A(x)} = 1/x$ führt zur exakten DG $y/x^2 - y'/x = 0$.

Der int. Faktor $1/y$ führt zur exakten DG $1/x - y'/y = 0$ wie in (2).

(6) Wir dividieren durch $x^2 + y^2$ und erhalten das Wirbelfeld:

$$\underbrace{\frac{-y}{x^2 + y^2}}_{f(x, y)} + \underbrace{\frac{x}{x^2 + y^2}}_{g(x, y)} y'(x) = 0$$

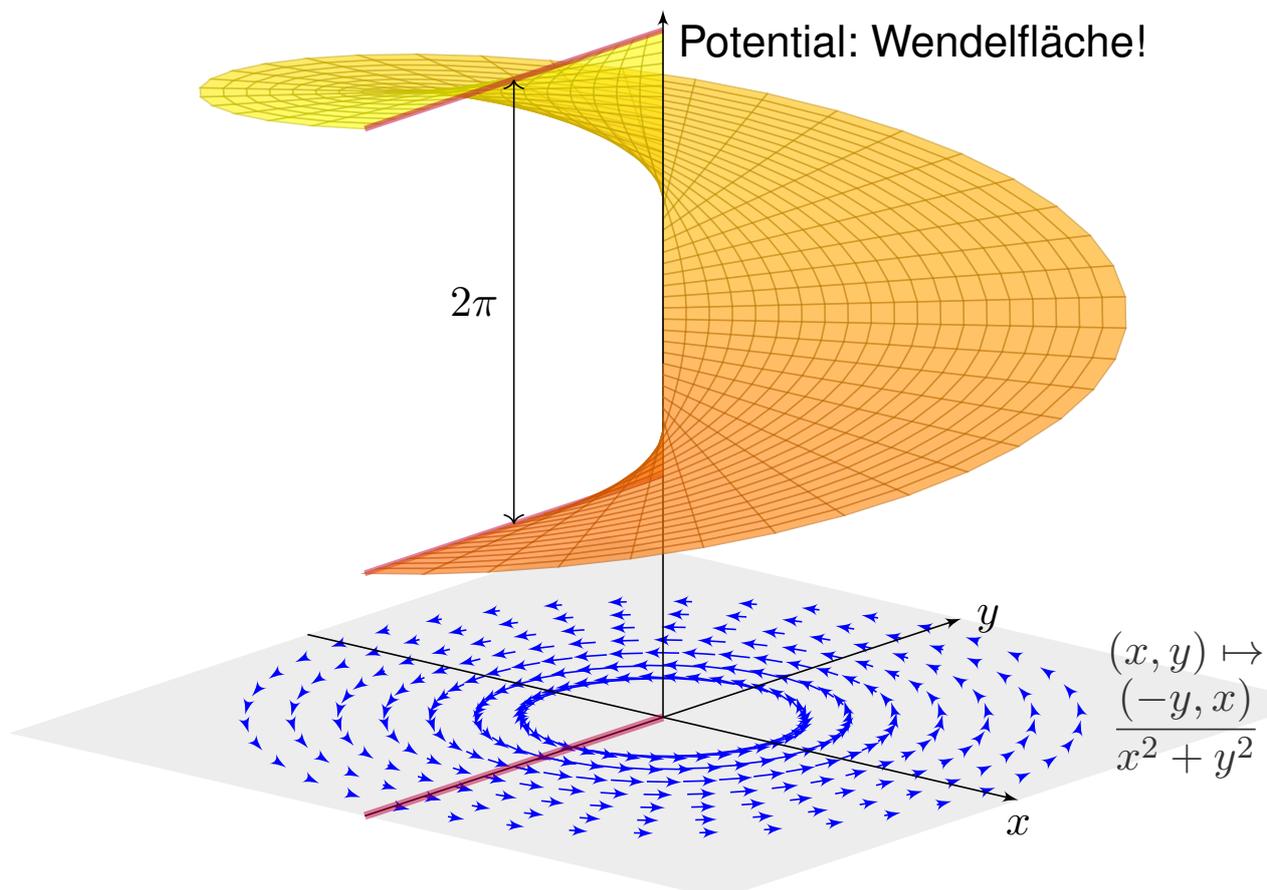
Auf der punktierten Ebene $G = \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ sind beide DG äquivalent.

Die zweite erfüllt nun zudem die notwendige Bedingung $\text{rot}(f, g) = 0$.

⚠ Das Gebiet G ist nun nicht mehr einfach zusammenhängend!

Potentiale sind Teile einer Wendelfläche: Diese schließt sich nicht!

Äquipotentialkurven sind Halbgeraden, wie in obigen Lösungen.



Wie können wir bequem feststellen, ob $y' = f(x, y)$ separierbar ist?
Wie können wir andernfalls nachweisen, dass dies unmöglich ist?

Satz M3A: Kriterium für Separierbarkeit

Gegeben sei $f : \mathbb{R}^2 \supseteq I \times J \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Äquivalent sind:

(0) Die Funktion f lässt sich als Produkt $f(x, y) = g(x) h(y)$ separieren mit stetigen Faktoren $g : I \rightarrow \mathbb{R}$ und $h : J \rightarrow \mathbb{R}$.

(1) Für je zwei Punkte $(x_0, y_0), (x_1, y_1) \in I \times J$ ist die Matrix

$$A = \begin{pmatrix} f(x_0, y_0) & f(x_0, y_1) \\ f(x_1, y_0) & f(x_1, y_1) \end{pmatrix}$$

singulär, ausgeschrieben $f(x_0, y_0)f(x_1, y_1) = f(x_1, y_0)f(x_0, y_1)$.

(2) Für jeden Punkt $(x_0, y_0) \in I \times J$ mit $f(x_0, y_0) \neq 0$ gilt

$$f(x, y) = \frac{f(x, y_0) \cdot f(x_0, y)}{f(x_0, y_0)} = g(x) h(y)$$

etwa mit $g : I \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto f(x, y_0)$ und $h : J \rightarrow \mathbb{R} : y \mapsto f(x_0, y)/f(x_0, y_0)$.

Separation der Variablen: wann und wie?

Nachrechnen: „(0) \Rightarrow (1)“: Angenommen es gilt $f(x, y) = g(x) h(y)$. Die Zeilenvektoren $g(x_0) \cdot (h(y_0), h(y_1))$ und $g(x_1) \cdot (h(y_0), h(y_1))$ sind dann linear abhängig, also $\det A = 0$. Gleiches gilt für Spaltenvektoren.

„(1) \Rightarrow (2)“: Aus $f(x_0, y_0)f(x, y) = f(x, y_0)f(x_0, y)$ für alle $(x, y) \in I \times J$ folgt die Aussage (2), indem wir durch $f(x_0, y_0) \neq 0$ dividieren.

„(2) \Rightarrow (0)“: Im Falle $f = 0$ genügen $g = 0$ und $h = 1$. Andernfalls gibt es einen Punkt $(x_0, y_0) \in I \times J$ mit $f(x_0, y_0) \neq 0$, sodass wir (2) anwenden können. Nach Konstruktion sind $g : I \rightarrow \mathbb{R}$ und $h : J \rightarrow \mathbb{R}$ stetig.

Die Äquivalenz (0) \Leftrightarrow (1) \Leftrightarrow (2) löst die eingangs gestellten Fragen:

😊 Wenn Sie $f(x, y)$ separieren wollen, dann zeigt (2) explizit wie:
So konstruieren Sie bequem die gewünschten Faktoren g und h .

😊 Wenn dies nicht möglich sein sollte, dann zeigt (1) das Hindernis:
Es genügt ein einziges Gegenbeispiel bestehend aus zwei Punkten $(x_0, y_0), (x_1, y_1) \in I \times J$ mit $f(x_0, y_0)f(x_1, y_1) \neq f(x_1, y_0)f(x_0, y_1)$.

Dann wissen Sie sicher, dass $y' = f(x, y)$ nicht separiert werden kann, und verschwenden keine kostbare Zeit mit langer, erfolgloser Suche.

Wie können wir bequem feststellen, ob $y' = f(x, y)$ linear ist?
Wie können wir andernfalls nachweisen, dass dies unmöglich ist?

Satz M3B: Kriterium für Linearität

Gegeben sei $f: \mathbb{R}^2 \supseteq I \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Äquivalent sind:

- (0) Die Zuordnung $(x, y) \mapsto f(x, y)$ ist affin-linear in y , das heißt: Für alle $(x, y) \in I \times \mathbb{R}$ gilt $f(x, y) = a(x)y + b(x)$, wobei $a, b: I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig sind.
- (1) Für jeden Punkt $(x, y) \in I \times \mathbb{R}$ gilt $f(x, y) = f(x, 1)y + f(x, 0)(1 - y)$.
- (2) Für $a, b: I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $a(x) = f(x, 1) - f(x, 0)$ und $b(x) = f(x, 0)$ gilt $f(x, y) = a(x)y + b(x)$ in jedem Punkt $(x, y) \in I \times \mathbb{R}$.

😊 Wenn Sie $f(x, y)$ linear schreiben wollen, dann zeigt (2) explizit wie: So konstruieren Sie bequem die gewünschten Funktionen a und b .

😊 Wenn dies nicht möglich sein sollte, dann zeigt (1) das Hindernis: Es genügt ein Gegenbeispiel mit $f(x, y) \neq f(x, 1)y + f(x, 0)(1 - y)$. Dann wissen Sie sicher, dass $y' = f(x, y)$ nicht linear sein kann, und verschwenden keine weitere Zeit mit erfolgloser Suche.

Linear oder separierbar, beides oder keines?

Aufgabe: Welche der folgenden Differentialgleichungen $y' = f_i(x, y)$ sind linear? separierbar? Begründen Sie jeweils Ihre Antwort!

$$f_1(x, y) = \frac{x^2y^2 + 2x^2 + xy^3 + 2xy - 3y^2 - 6}{y^2 + 2}, \quad f_2(x, y) = \frac{x^2y - 1}{x^2y - x^3}$$

Lösung: (1) Ist f_1 affin-linear in y , also $f_1(x, y) = a(x)y + b(x)$, dann mit $f_1(x, 0) = x^2 - 3 = b(x)$ und $f_1(x, 1) = x + x^2 - 3$, also $a(x) = x$. Tatsächlich können wir den angegebenen Bruch wesentlich kürzen:

$$f_1(x, y) = \frac{(x^2 + xy - 3)(y^2 + 2)}{y^2 + 2} = \underbrace{x}_{a(x)} y + \underbrace{x^2 - 3}_{b(x)}$$

Ist f_1 separierbar? Nach einigen Proben sehen wir: Nein! Gegenbeispiel $f_1(0, 0)f_1(1, 1) = (-3) \cdot (-1) = 3$ und $f_1(1, 0)f_1(0, 1) = (-2) \cdot (-3) = 6$.

(2) Wäre $(x, y) \mapsto f_2(x, y)$ affin-linear in y , dann speziell auch für $x = 2$, also $y \mapsto (4y - 1)/(4y - 8)$. Dies hat jedoch eine Polstelle in $y = 2$!

Ist f_2 separierbar? Nach einigen Proben sehen wir: Nein! Gegenbeispiel: Es gilt $f_2(1, 2)f_2(-1, 3) = \frac{1}{1} \cdot \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$, aber $f_2(-1, 2)f_2(1, 3) = \frac{2}{2} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{3}$.

Showdown: eine Handvoll Differentialgleichungen

M317



Aufgabe: Mit welchen unserer Methoden können Sie folgende Differentialgleichungen lösen? Lösen Sie jede DG mit einem (jedem) der möglichen Verfahren. Machen Sie die Probe!

Gleichung \ Verfahren	Separation (M1A, M3A)	exakte DG (M2A, M2C)	lineare DG (M2E, M3B)
(1) $yy' + 2 \sin(x) = 0$	✓	✓	–
(2) $y' = x + y$	–	–	✓
(3) $y' = y^2 \sin(x)$	✓	–	–
(4) $4 - \frac{y^2}{x^2} + 2\frac{y}{x}y' = 0$	–	✓	–
(5) $y' = \frac{y}{\sqrt{x}} + \frac{1}{\sqrt{x}}$	✓	–	✓

Showdown: eine Handvoll Differentialgleichungen

 M318
Übung

(1) Die Differentialgleichung $yy' + 2 \sin(x) = 0$ ist nicht linear (M3B), aber exakt (M2A): Es gilt Rotationsfreiheit $\partial_x y = 0 = \partial_y \sin(x)$, und das (implizit gegebene) Definitionsgebiet \mathbb{R}^2 ist einfach zusammenhängend. Zum Vektorfeld (f, g) mit $f(x, y) = 2 \sin(x)$ und $g(x, y) = y$ finden wir das Potential $\Phi(x, y) = y^2/2 - 2 \cos(x)$. Auflösen von $\Phi(x, y(x)) = c$ ergibt die Lösungen $y(x) = \pm \sqrt{4 \cos(x) + c}$, wobei $c > -4$.

Diese DG kann ebenso durch Separation (M1A) gelöst werden:

$$\begin{aligned}
 y(x) y'(x) &= -2 \sin(x) \\
 \implies \int y(x) y'(x) dx &= \int -2 \sin(x) dx \\
 \implies y(x)^2/2 &= 2 \cos(x) + \text{const} \\
 \implies y(x) &= \pm \sqrt{4 \cos(x) + c}
 \end{aligned}$$

Probe: $y'(x) = \mp 2 \sin(x) / \sqrt{4 \cos(x) + c}$ erfüllt $y(x) y'(x) + 2 \sin(x) = 0$.

(2) Die zweite Differentialgleichung $y' = x + y$ ist nicht exakt (M2A), denn $\partial_x(1) = 0 \neq -1 = \partial_y(-x - y)$, und auch nicht separierbar (M3A). Sie ist offensichtlich linear (M2E), und zwar mit $a(x) = 1$ und $b(x) = x$.

Integrierender Faktor ist hier $A(x) = \int_{t=x_0}^x a(t) dt = \int_{t=x_0}^x 1 dt = x - x_0$:

$$\begin{aligned} y(x) &= e^{A(x)} \int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt + e^{A(x)} y_0 = e^{x-x_0} \int_{t=x_0}^x e^{x_0-t} t dt + e^{x-x_0} y_0 \\ &= e^{x-x_0} \left[-(e^{x_0-t})(1+t) \right]_{t=x_0}^x + e^{x-x_0} y_0 = -(1+x) + e^{x-x_0}(1+x_0+y_0) \end{aligned}$$

Probe: $y'(x) = -1 + e^{x-x_0}(1+x_0+y_0)$ erfüllt $y'(x) = x + y$.

(3) Die DG $y' = y^2 \sin(x)$ ist nicht exakt (M2A) und nicht linear (M3B), aber separierbar. Eine offensichtliche Lösung ist $y = 0$. Für $y \neq 0$ gilt:

$$\begin{aligned} y'(x) = y(x)^2 \sin(x) &\implies \frac{y'(x)}{y(x)^2} = \sin(x) \\ \implies \int \frac{y'(x)}{y(x)^2} dx = \int \sin(x) dx &\implies -\frac{1}{y(x)} = -\cos(x) + \text{const} \\ \implies \frac{1}{y(x)} = \cos(x) + c &\implies y(x) = \frac{1}{\cos(x) + c} \end{aligned}$$

Probe: $y'(x) = \sin(x)/(\cos(x) + c)^2$ erfüllt $y'(x) = y(x)^2 \sin(x)$.

(4) Die Differentialgleichung $4 - y^2/x^2 + 2yy'/x = 0$ ist weder linear (M3B), noch separierbar (M3A), aber exakt (M2A): Wir finden das Potential $\Phi(x, y) = 4x + y^2/x$. Auflösen von $4x + y(x)^2/x = c$ ergibt $y(x) = \pm\sqrt{cx - 4x^2}$. Probe: $y'(x) = \pm(c-8x)/2\sqrt{cx-4x^2}$ erfüllt die DG.

(5) Die DG $y' = y/\sqrt{x} + 1/\sqrt{x}$ ist nicht exakt (M2A), aber linear (M2E) und separierbar (M1A): Eine Lösung ist $y = -1$. Für $y \neq -1$ finden wir:

$$\begin{aligned} y'(x) = \frac{y(x) + 1}{\sqrt{x}} &\implies \frac{y'(x)}{y(x) + 1} = \frac{1}{\sqrt{x}} \\ \implies \int \frac{y'(x)}{y(x) + 1} dx = \int \frac{1}{\sqrt{x}} dx &\implies \ln|y(x) + 1| = 2\sqrt{x} + \text{const} \\ \implies |y(x) + 1| = e^{2\sqrt{x} + \text{const}} &\implies y(x) = c e^{2\sqrt{x}} - 1 \end{aligned}$$

Der Faktor $c = \pm e^{\text{const}}$ kann Werte in $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ annehmen; im Fall $c = 0$ finden wir erneut $y(x) = -1$. Probe: $y'(x) = c e^{2\sqrt{x}}/\sqrt{x}$ erfüllt die DG.

Die Lösungsformel M2E für lineare DG liefert dasselbe Ergebnis; diese Rechnung führe ich hier nicht aus, sondern empfehle sie als Übung.

Aufgabe: Wir suchen alle Funktionen $y: \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$x^3 y'(x) = 2y(x) \quad \text{für alle } x \in I.$$

(1) Klassifizieren Sie diese Differentialgleichung nach unserem Katalog: Ordnung, implizit / explizit, algebraisch, linear, separierbar, exakt, ...

Finden Sie Lösungen $y: \mathbb{R}_{<0} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y(-1) = a/e$ und $y: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y(1) = b/e$, wobei $a, b \in \mathbb{R}$. Sind diese Lösungen eindeutig? Skizze!

(2) Lassen sich diese lokalen Lösungen zu einer globalen Lösung $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ auf ganz \mathbb{R} fortsetzen? Welcher Wert $y(0)$ muss zur Stetigkeit gewählt werden? Ist y dann differenzierbar? sogar stetig differenzierbar?

(3) Zu welchen Anfangswerten $y(x_0) = y_0$ existieren globale Lösungen $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$? Sind diese eindeutig? Genauer: Durch welche Punkte $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ läuft genau eine Lösung / unendliche viele / gar keine?

(4) Sind die Lösungen $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ unendlich oft differenzierbar? Sind sie analytisch? Finden Sie alle analytischen Lösungen!

 Siehe Stroppel, Höhere Mathematik 2, Beispiel 2.6.12, sowie [B438](#). Obige Differentialgleichung [M119](#) ist ähnlich, aber weniger dramatisch.

Rationale DG mit nicht-analytischen Lösungen

Lösung: (1) Diese DG ist von erster Ordnung, implizit, algebraisch, d.h. von der Form $F(x, y, y') = 0$ mit einem Polynom F in x, y, y' . Die explizite Gleichung $y'(x) = 2x^{-3}y(x)$ für $x \neq 0$ ist linear in y . Die Gleichung kann für $x \neq 0$ und $y \neq 0$ separiert werden:

$$\begin{aligned} \frac{y'(x)}{y(x)} = \frac{2}{x^3} &\implies \int \frac{y'(x)}{y(x)} dx = \int \frac{2}{x^3} dx \\ &\implies \ln y(x) = -1/x^2 + c \implies y(x) = C e^{-1/x^2} \end{aligned}$$

Lokale Lösungen sind $y: \mathbb{R}_{<0} \rightarrow \mathbb{R}: x \mapsto a e^{-1/x^2}$ mit $y(-1) = a/e$ und $y: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}: x \mapsto b e^{-1/x^2}$ mit $y(1) = b/e$. Beide sind jeweils eindeutig.

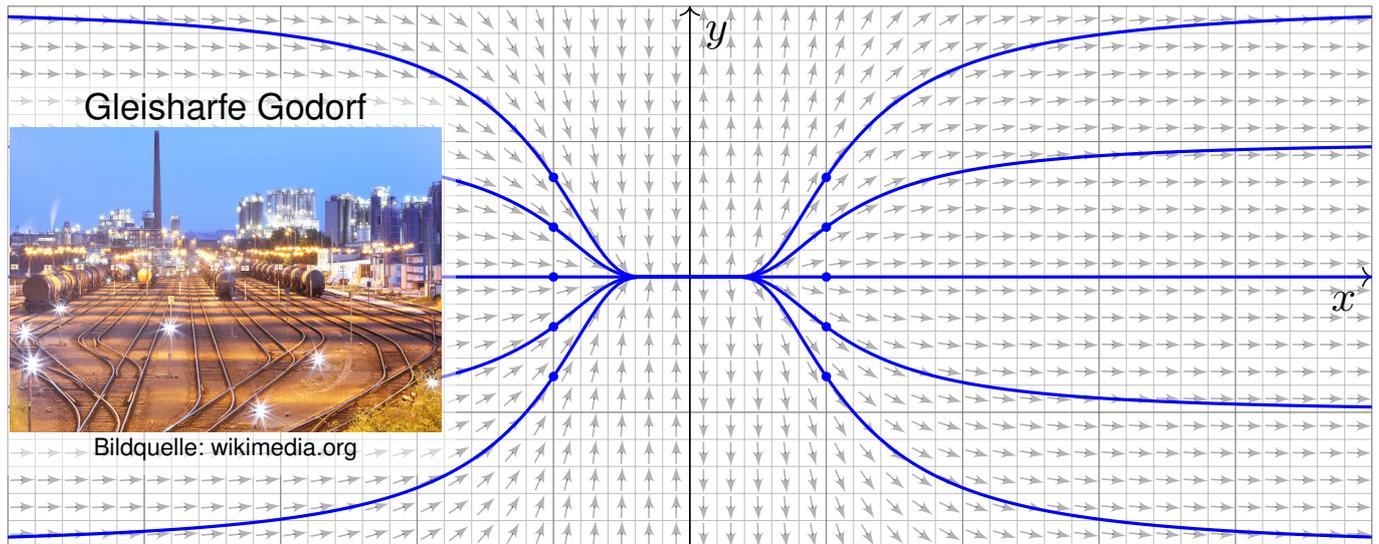
(2) Für $x \nearrow 0$ gilt $a e^{-1/x^2} \rightarrow 0$. Für $x \searrow 0$ gilt $b e^{-1/x^2} \rightarrow 0$. Wir setzen:

$$y_{a,b}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}: x \mapsto y(x) = \begin{cases} a e^{-1/x^2} & \text{für } x < 0, \\ 0 & \text{für } x = 0, \\ b e^{-1/x^2} & \text{für } x > 0. \end{cases}$$

Diese Funktion ist stetig und sogar stetig differenzierbar (siehe unten).

 Damit sind alle Lösungen unserer Differentialgleichung gefunden!

Skizze der Lösungen $y_{a,b} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ für verschiedene Werte $a, b \in \mathbb{R}$:



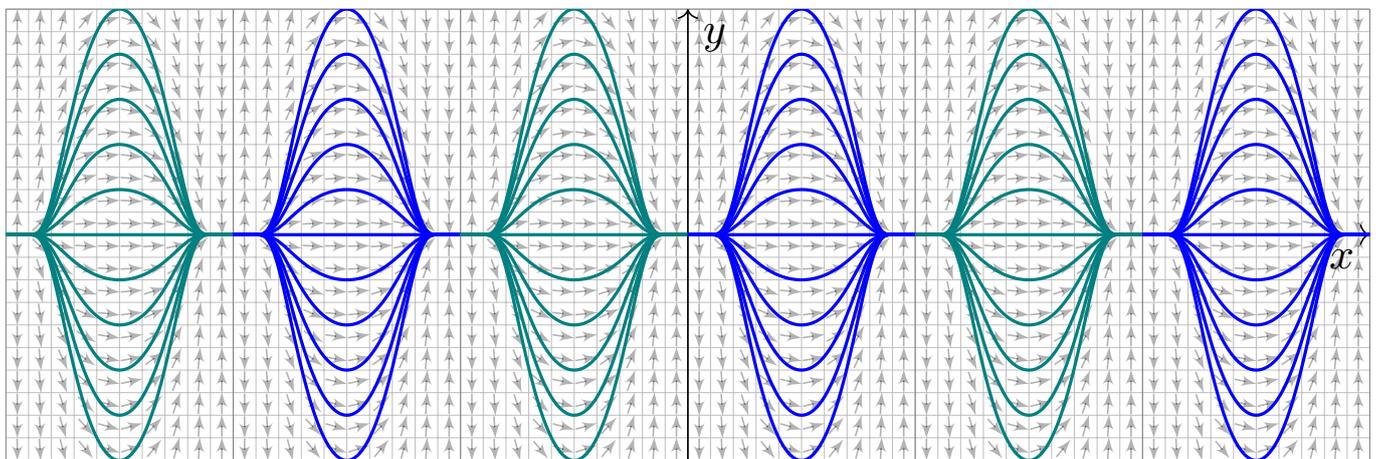
(3) Durch Punkte (x_0, y_0) mit $x_0 = 0$ und $y_0 \neq 0$ geht keine Lösung. Durch jeden anderen Punkt verlaufen unendlich viele Lösungen $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$!

Zu $y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $x^3 y'(x) = 2y(x)$ ist kein Anfangswertproblem $y(x_0) = y_0$ gut gestellt. Die Einschränkung von y auf $\mathbb{R}_{<0}$ ist die eindeutige Lösung des AWP $y(-1) = a/e$ auf $\mathbb{R}_{<0}$. Die Einschränkung von y auf $\mathbb{R}_{>0}$ ist die eindeutige Lösung des AWP $y(+1) = b/e$ auf $\mathbb{R}_{>0}$. Erst die Wahl *beider* Parameter $a, b \in \mathbb{R}$ legt die globale Lösung $y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ eindeutig fest. Die Funktion y ist auf $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ analytisch, an der Klebestelle 0 noch glatt, aber nicht analytisch.

Rationale DG mit nicht-analytischen Lösungen

(4) Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = e^{-1/x^2}$ für $x > 0$ und $f(x) = 0$ für $x \leq 0$ ist beliebig oft diff'bar und in jedem Punkt $x \neq 0$ analytisch. B438

Jede Lösung $y_{a,b}(x) = af(-x) + bf(x)$ ist beliebig oft differenzierbar. Sie ist analytisch nur für $a = b = 0$, also die Nullfunktion $y_{0,0} = 0$.



😊 Ebenso lösen wir $\sin(x)^3 y'(x) = 2 \cos(x) y(x)$ zu $y(x) = a e^{-1/\sin(x)^2}$. Das erinnert an kosmologische Modelle vom Big Bang zum Big Crunch: Dazwischen ist die Entwicklung deterministisch, darüber hinaus wird alle Information vollständig gelöscht (als vage, aber eindruckliche Analogie).

Aufgabe: Finden Sie alle maximalen Lösungen

$$(1) \quad y: I \rightarrow \mathbb{R}_{>0} \quad \text{mit} \quad y'(x) = \sqrt[3]{y(x)^2},$$

$$(2) \quad y: I \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \quad \text{mit} \quad y'(x) = \sqrt[3]{y(x)^2},$$

$$(3) \quad y: I \rightarrow \mathbb{R} \quad \text{mit} \quad y'(x) = \sqrt[3]{y(x)^2}.$$

(a) Skizzieren Sie das Richtungsfeld und mögliche Lösungskurven.

(b) Qualitative Lösung: Welche AWP $y(x_0) = y_0$ sind gut gestellt?

(c) Quantitative Lösung: Berechnen Sie alle maximalen Lösungen.

Lösung: (1c) Für $y > 0$ ist unsere DG äquivalent zu $y' = y^{2/3}$.

Separation $y^{-3/2} y' = 1$ und Integration zu $3y^{1/3} = x - b$.

Auflösen liefert $y(x) = (x - b)^3/27$ für $x > b$. Probe!

(1b) Zu jedem $b \in \mathbb{R}$ erhalten wir somit die maximale Lösung

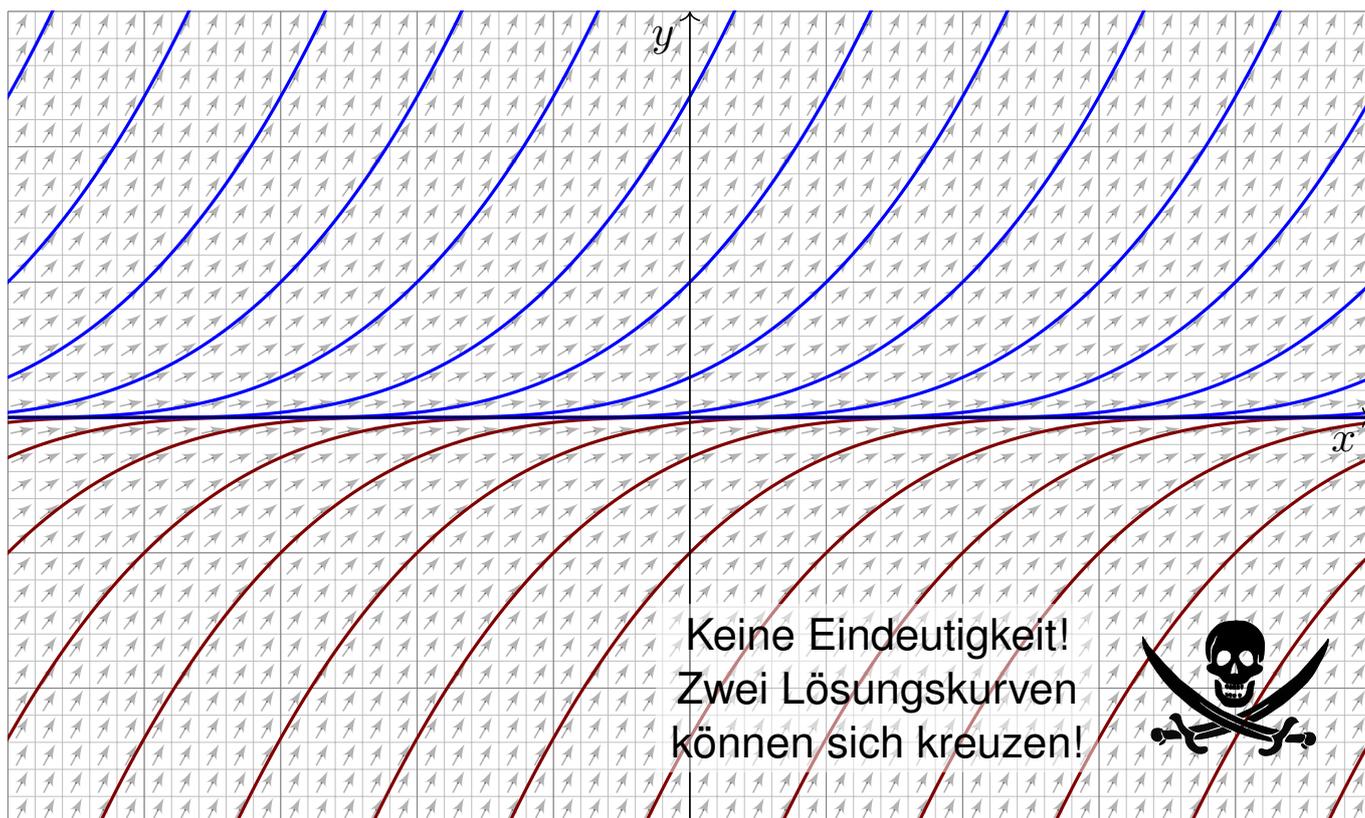
$$y_b:]b, \infty[\rightarrow \mathbb{R}_{>0}, \quad y_b(x) = (x - b)^3/27.$$

Durch jeden Startpunkt $(x_0, y_0) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}_{>0}$ läuft genau eine Lösung.

😊 Hier ist demnach jedes AWP $y(x_0) = y_0 > 0$ gut gestellt.

Gut & schlecht gestellte Anfangswertprobleme

(1a) Eine Skizze der gefundenen Lösungen schafft wie immer Überblick:



(2c) Für $y \geq 0$ ist zudem die konstante Funktion $y(x) = 0$ eine Lösung.
Für $y > 0$ kennen wir die Lösungen $y_b(x) = (x - b)^3/27$ für $x > b$.
Jede lässt sich eindeutig fortsetzen zur maximalen Lösung

$$y_b : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} : x \mapsto y_b(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq b, \\ (x - b)^3/27 & \text{für } x \geq b. \end{cases}$$

(2b) Durch jeden Startpunkt (x_0, y_0) mit $y_0 > 0$ läuft genau eine Lösung.
Durch jeden Punkt $(x_0, 0)$ hingegen laufen unendlich viele Lösungen!

⚠ Jedes AWP $y(x_0) = y_0 > 0$ ist gut gestellt, aber $y(x_0) = 0$ schlecht.

Ohne Vorsichtsmaßnahmen sind Lösungen nicht immer eindeutig,
d.h. zum selben Anfangswert kann es verschiedene Lösungen geben.

Wir haben dieses Problem bereits für die Wasseruhr [M123](#) diskutiert.

Die Gleisharfe [M321](#) illustriert ebenso das Mehrdeutigkeitsproblem.

Der vorliegende Fall ist ähnlich. Aber es kommt noch schlimmer...

(3c) Für $y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ist die konstante Funktion $y(x) = 0$ eine Lösung.
Für $y > 0$ kennen wir die Lösung $y(x) = (x - b)^3/27$ für $x > b$.
Für $y < 0$ finden wir ebenso $y(x) = (x - a)^3/27$ für $x < a$. Probe!
Für alle $a \leq b$ in \mathbb{R} setzen wir diese zusammen zur maximalen Lösung

$$y_{a,b} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto y_{a,b}(x) = \begin{cases} (x - a)^3/27 & \text{für } x \leq a, \\ 0 & \text{für } a \leq x \leq b, \\ (x - b)^3/27 & \text{für } x \geq b. \end{cases}$$

Hierbei lassen wir auch die Sonderfälle $a = -\infty$ und $b = +\infty$ zu.

(3b) Hier ist kein Anfangswertproblem $y'(x_0) = y_0$ gut gestellt.

⚠ Durch jeden Punkt $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ laufen unendlich viele Lösungen.

$\exists \& E$: Die rechte Seite ist nach y stetig diff'bar mit $\partial_y(y^{2/3}) = \frac{2}{3}y^{-1/3}$.
Dies gilt nur für $y \neq 0$. Auf der x -Achse gilt dieses Kriterium nicht mehr!
In solch kritischen Punkten ist Vorsicht und besondere Sorgfalt geboten.

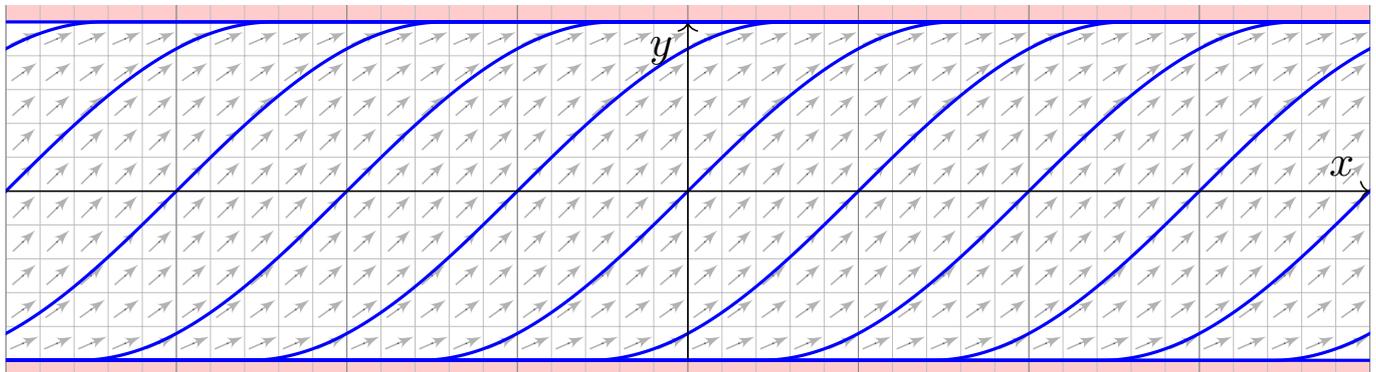
Aufgabe: Wir lösen die implizite Differentialgleichung $(y')^2 + y^2 = 1$ für $y' > 0$ bzw. $y' \geq 0$ auf zu den expliziten Differentialgleichungen

$$(1) \quad y'(x) = \sqrt{1 - y(x)^2} \quad \text{für} \quad -1 < y < 1,$$

$$(2) \quad y'(x) = \sqrt{1 - y(x)^2} \quad \text{für} \quad -1 \leq y \leq 1.$$

- (a) Skizzieren Sie das Richtungsfeld und mögliche Lösungskurven.
 (b) Qualitative Lösung: Welche AWP $y(x_0) = y_0$ sind gut gestellt?
 (c) Quantitative Lösung: Berechnen Sie alle maximalen Lösungen.

Lösung: (a) Richtungsfeld und Lösungsskizzen auf $G = \mathbb{R} \times [-1, +1]$:



(b) Zum Überblick suchen wir zunächst die **qualitative Lösung**:

Die rechte Seite $f(x, y) = \sqrt{1 - y^2}$ ist stetig auf ganz $G = \mathbb{R} \times [-1, 1]$. Der \exists &E-Satz garantiert hier zumindest die **Existenz** von Lösungen.

Das heißt: Zu jedem Anfangswert (x_0, y_0) mit $x_0 \in \mathbb{R}$ und $-1 \leq y_0 \leq 1$ existiert **mindestens** eine Lösung; diese läuft beidseitig bis zum Rand.

Wir untersuchen genauer die Ableitung $\partial_y f(x, y) = -y/\sqrt{1 - y^2}$.

Die Funktion f ist stetig diff'bar auf dem Inneren $G^\circ = \mathbb{R} \times]-1, 1[$.

Der Satz garantiert hier **Existenz und Eindeutigkeit** von Lösungen.

Das heißt: Zu jedem Anfangswert (x_0, y_0) mit $x_0 \in \mathbb{R}$ und $-1 < y_0 < 1$ existiert **genau eine** Lösung; diese läuft beidseitig bis zum Rand.

😊 Diesen ersten Überblick verschaffen wir uns ganz ohne Rechnung! Manchmal ist das auch schon alles, was wir wollen... oder können.

⚠ Die mangelnde Ableitung $\partial_y f$ auf dem Rand $y = \pm 1$ mahnt uns zu Vorsicht: Möglicherweise geht die Eindeutigkeit hier verloren.

⚠ Auf dem Rand macht der \exists &E-Satz keine Aussage mehr. Wir lösen die Gleichung und schauen genauer hin...

(c) Nun berechnen wir explizit die **quantitative Lösung**:

(1c) Für $-1 < y < 1$ gilt $\sqrt{1-y^2} \neq 0$, und wir können dividieren: Separation $y'/\sqrt{1-y^2} = 1$ und Integration zu $\arcsin(y) = x - c$ liefert $y(x) = \sin(x - c)$ unter der Bedingung $x \in]c - \pi/2, c + \pi/2[$.

(2c) Für jedes $c \in \mathbb{R}$ erhalten wir so die maximale Lösung

$$y_c : \mathbb{R} \rightarrow [-1, 1] : x \mapsto y_c(x) = \begin{cases} -1 & \text{für } x \leq c - \pi/2, \\ \sin(x - c) & \text{für } c - \pi/2 \leq x \leq c + \pi/2, \\ +1 & \text{für } x \geq c + \pi/2. \end{cases}$$

Auch die konstanten Funktionen $y(x) = \pm 1$ sind Lösungen ($c = \mp\infty$).

😊 Zu jedem AWP (x_0, y_0) mit $|y_0| < 1$ existiert genau eine Lösung y_c . Für genau eine Verschiebung $c \in \mathbb{R}$ läuft y_c durch den Punkt (x_0, y_0) .

⚠️ Zum AWP (x_0, y_0) mit $y_0 = +1$ existieren unendlich viele Lösungen. Nämlich die konstante Lösung $y = +1$ sowie alle y_c mit $c \leq x_0 - \pi/2$.

⚠️ Zum AWP (x_0, y_0) mit $y_0 = -1$ existieren unendlich viele Lösungen. Nämlich die konstante Lösung $y = -1$ sowie alle y_c mit $c \geq x_0 + \pi/2$.

Zur Illustration habe ich hier vornehmlich Beispiele vorgestellt, die sich möglichst leicht und in geschlossener Form lösen lassen.

Für viele Differentialgleichungen ist keine geschlossene Lösung möglich! Zum Beispiel hat $y'(x) = e^{-x^2/2}$ mit $y(0) = 0$ die eindeutige Lösung

$$y(x) = \int_{t=0}^x e^{-t^2/2} dt.$$

Für dieses Integral gibt es nachweislich keine elementare Formel. B145

In solchen Fällen greifen wir auf numerische Methoden zurück. B147

Damit lässt sich nahezu jede praktische Frage ebenso gut handhaben.

Bevor man jedoch solcherart numerische Approximation unternimmt, muss man sicherstellen, dass die DG gut gestellt ist, also das Problem überhaupt eine eindeutige Lösung hat, die man approximieren könnte.

Die Sorgfalt gebietet daher, das Problem zunächst qualitativ zu lösen, also Existenz, Eindeutigkeit und Stabilität der Lösung sicherzustellen, und den Verlauf der Lösung möglichst präzise einzugrenzen. M445

Erst dann darf man sich getrost numerischen Näherungen zuwenden.

Ab Zeitpunkt $t = 0$ min wird per Infusion ein Medikament verabreicht. Der Durchfluss ist auf $b = 6$ mg/min eingestellt. Der Körper baut in jeder Minute 5% des im Blut vorhandenen Medikaments ab ($a = 0.05$ /min).

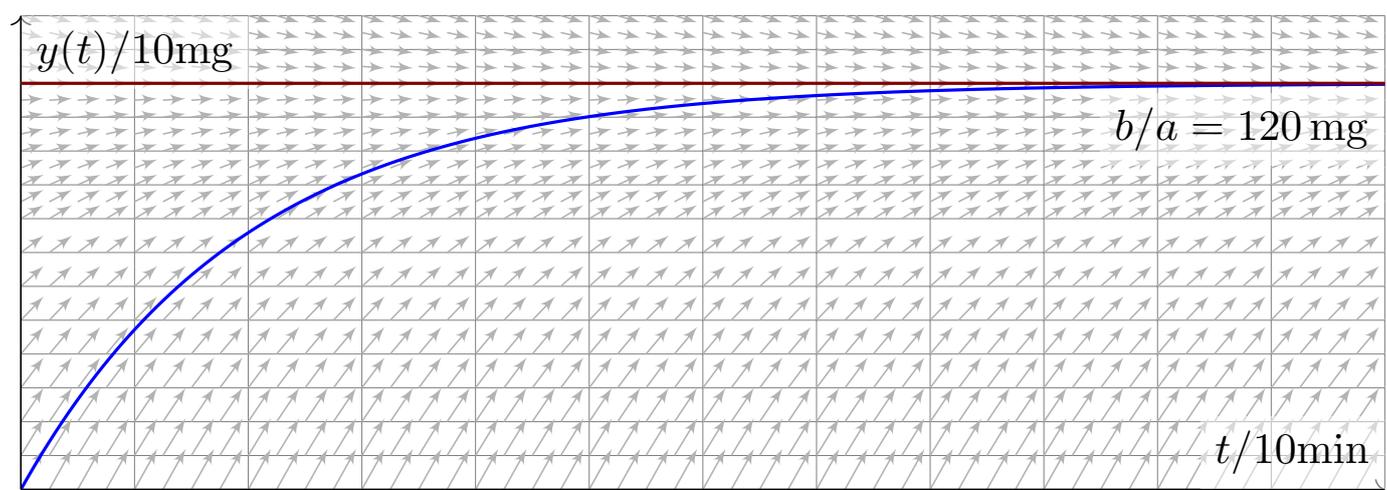
Aufgabe: (1) Beschreiben Sie die Medikamentenmenge $y(t)$ im Blut durch eine Differentialgleichung. Probe: Gelten in dieser Gleichung die richtigen physikalischen Einheiten? (2) Skizzieren Sie das Vektorfeld. (3) Lösen Sie diese Differentialgleichung. Ist die Lösung eindeutig? (4) Wie verhält sich $y(t)$ für $t \rightarrow \infty$? Ist dies plausibel?

😊 Das ist ein besonders einfaches Modell, aber sehr häufig verwendet. Es gilt ebenso beim Konsum einer Droge, etwa Alkohol, die über einen längeren Zeitraum konstant zugeführt und zugleich abgebaut wird.

Im Gegensatz zu den vorigen Aufgaben ist hier die Differentialgleichung in der Aufgabenstellung noch nicht gegeben, sondern muss als erstes gefunden und anschließend gelöst werden. Diese Art Problemstellung ist wesentlich realistischer, daher interessanter, aber meist auch spürbar schwieriger; wir illustrieren dies nur an besonders einfachen Fällen.

📖 H. Heuser: *Gewöhnliche Differentialgleichungen*, Vieweg 2009

Lösung: (1) Wir messen die Zeit t in Minuten. Für die Medikamentenmenge $y(t) \in \mathbb{R}$ finden wir die Gleichung $y'(t) = b - a y(t)$ mit $y(0) = 0$. Diese DG ist linear und inhomogen, allgemeine Lösung siehe M221.



(3) Wir lösen die DG hier durch die Substitution $u(t) = b/a - y(t)$ und finden $u'(t) = -y'(t) = a y(t) - b = -a u(t)$ mit $u(0) = b/a$. Die Lösung $u(t) = (b/a) e^{-at}$ und $y(t) = (b/a)(1 - e^{-at})$ ist dann direkt klar.

(4) Für $t \rightarrow \infty$ gilt $y(t) \rightarrow b/a$. 😊 Wir sehen dies leicht auch direkt: Im Gleichgewicht wird gleich viel zugeführt ($+b$) wie abgebaut ($-a \cdot b/a$).

Ein Kaffee wird bei 100°C gebrüht. Die Raumtemperatur beträgt 20°C . Abkühlung reduziert die Temperaturdifferenz um 7% pro Minute.

Aufgabe: (1) Beschreiben Sie die Temperatur $y(t)$ des Kaffees durch eine Differentialgleichung. Probe: Gelten in dieser Gleichung die richtigen physikalischen Einheiten? (2) Skizzieren Sie das Vektorfeld. (3) Lösen Sie diese Differentialgleichung. Ist die Lösung eindeutig? (4) Wie verhält sich $y(t)$ für $t \rightarrow \infty$? Ist dies physikalisch plausibel? (5) Wann hat der Kaffee 60°C erreicht? 😊 Das ist die Halbwertszeit. (6) Sie sind in Eile und haben nur 5min Wartezeit zur Verfügung. Ist es besser, die Milch am Anfang oder am Ende zuzugeben? (konkretes Zahlenbeispiel: 75% Kaffee, 25% Milch zu 8°C).

😊 Das ist eine klassische Aufgabe, mit unserem Werkzeug sollte sie leicht fallen. Es gelten dieselben Bemerkungen wie zur vorigen Aufgabe. In Frage (6) stecken zahlreiche implizite Annahmen, wie die Form der Tasse und die Art des Wärmeaustauschs; erklären Sie diese explizit! Die konkreten Zahlen sind etwas willkürlich, dafür aber einfach genug. Je nach Situation werden Sie deutlich andere Konstanten messen.

Lösung: (1) Wir starten bei $y_0 = 100^\circ\text{C}$ und nähern uns $y_\infty = 20^\circ\text{C}$ gemäß der Gleichung $y'(t) = -\lambda[y(t) - y_\infty]$ mit $\lambda = 0.07/\text{min}$. (3) Die Lösung $y(t) = y_\infty + (y_0 - y_\infty)e^{-\lambda t}$ ist leicht zu sehen. (4) Für $t \rightarrow \infty$ gilt $y(t) \searrow y_\infty$, wie anschaulich zu erwarten war. (5) Bei 60°C wurde die Hälfte der Temperaturdifferenz abgebaut: $y(T) \stackrel{!}{=} 60^\circ$ bedeutet $1/2 = e^{-\lambda T}$, also $-\ln 2 = -\lambda T$ und somit

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{0.07/\text{min}} \approx 9.9 \text{ min}, \quad \text{Merkregel: } \frac{70\%}{\text{Zerfallsrate}}$$

(6a) Erst die Milch zugeben, dann den Milchkaffee abkühlen lassen:

$$y(0 \text{ min}) = 0.75 \cdot 100^\circ\text{C} + 0.25 \cdot 8^\circ\text{C} = 77.0^\circ\text{C}$$

$$y(5 \text{ min}) = 20^\circ\text{C} + 57^\circ\text{C} \cdot e^{-0.35} \approx 60.2^\circ\text{C}$$

(6b) Erst den Kaffee abkühlen lassen, dann die Milch zugeben:

$$y(5 \text{ min}) = 20^\circ\text{C} + 80^\circ\text{C} \cdot e^{-0.35} \approx 76.4^\circ\text{C}$$

$$\text{Mischung} = 0.75 \cdot 76.4^\circ\text{C} + 0.25 \cdot 8^\circ\text{C} \approx 59.3^\circ\text{C}$$

😊 Wenn Sie Ihren Milchkaffee weniger heiß wollen, dann geben Sie die Milch erst am Ende hinzu. Der Unterschied ist allerdings kaum spürbar.

Wir untersuchen die Größe $y(x) \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ einer Population (z.B. Bakterien, Pflanzen, Tiere, ...) im Verlauf der Zeit $x \in \mathbb{R}_{\geq 0}$. Das einfachste Modell ist eine Wachstumsrate $y'(x)$ proportional zur Populationsgröße $y(x)$:

$$y'(x) = \lambda y(x), \quad y(0) = y_0$$

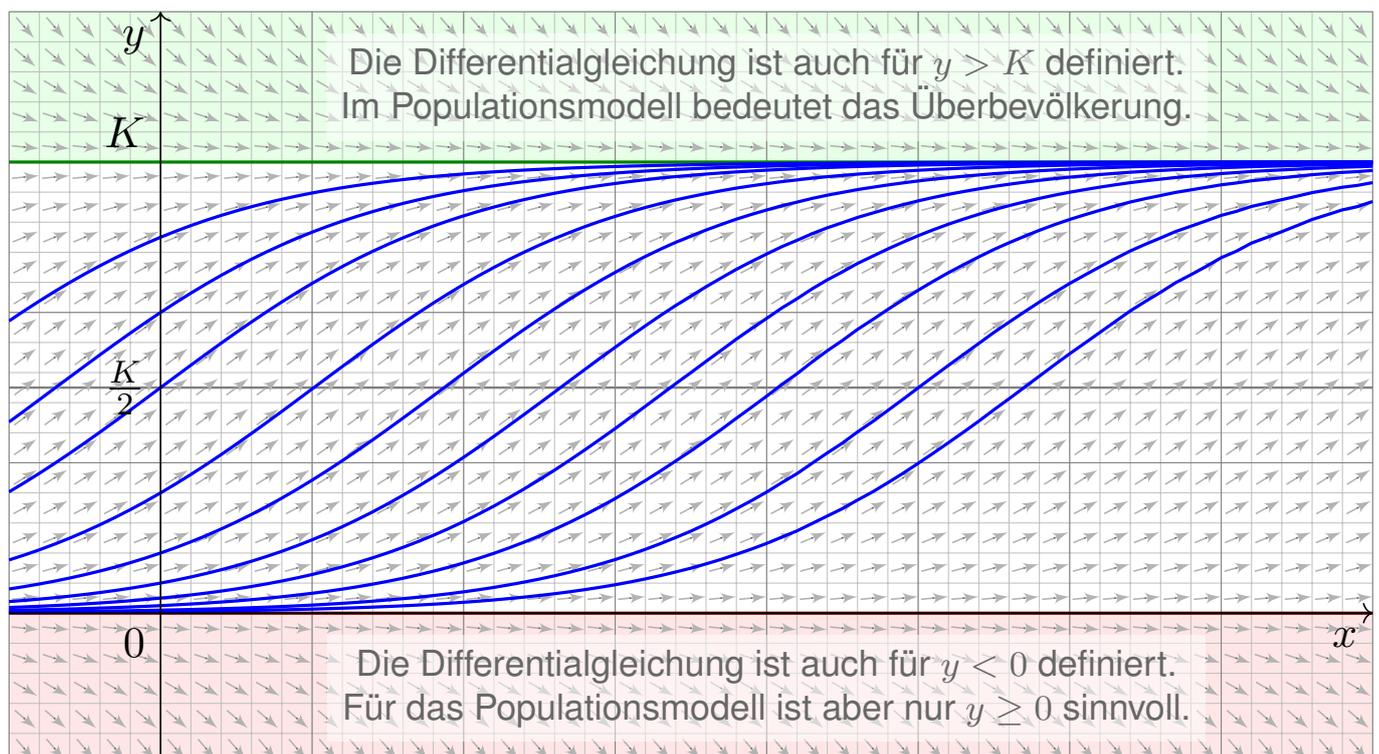
Die Lösung $y(x) = y_0 e^{\lambda x}$ ist exponentielles Wachstum. Für $\lambda > 0$ und $y_0 > 0$ wächst $y(x)$ unbeschränkt. Realistischer ist folgendes Modell: Wegen beschränkter Ressourcen gibt es eine maximale Größe K der Population. Ihr Wachstum wird gebremst durch den Faktor $1 - y(x)/K$:

$$y'(x) = \lambda y(x)(1 - y(x)/K), \quad y(0) = y_0$$

Dies ist die **logistische Differentialgleichung**. Sie ist ein einfaches nicht-lineares Modellbeispiel und Spezialfall der Bernoulli-Gleichung.

Aufgabe: (1) Skizzieren Sie das zugehörige Vektorfeld. (2) Bestimmen Sie alle Fixpunkte (= konstante Lösungen). (3) Bei Start in $y(0) \in]0, K[$, bleibt jede Lösung beschränkt? (4) Existiert eine Lösung für alle $x \geq 0$, also $y: \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}$? Ist sie eindeutig? (5) Wie verhält sie sich für kleine y ? (6) für $x \rightarrow \infty$? (7) Berechnen Sie die Lösung $y(x)$ schließlich explizit.

Lösung: (1) Skizze des Vektorfeldes und einiger Lösungskurven:



(2) Fixpunkte von $y' = \lambda y(1 - y/K)$ sind Nullstellen der rechten Seite, also $y = 0$ (keine Population) und $y = K$ (maximale Populationsgröße).

(3) Dank (2) haben wir die konstanten Lösungen $u(x) = 0$ und $v(x) = K$. Jede Lösung $y: [0, x_1[\rightarrow \mathbb{R}$ mit $y(0) \in]0, K[$ ist somit im Intervall $]0, K[$ gefangen: Dank Eindeutigkeitsatz M1c kann sie u und v nicht kreuzen.

(4) Da eine Lösung $y: [0, x_1[\rightarrow]0, K[$ keine Polstellen hat, lässt sie sich für alle $x \geq 0$ fortsetzen (M1c) zu genau einer Lösung $y: \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow [0, K]$.

(5) Für $y/K \approx 0$ gilt $y' \approx \lambda y$: Kleine Populationen wachsen demnach zunächst exponentiell; die Maximalgröße K hat noch kaum Einfluss. Nahe der Maximalgröße $y \approx K$ gilt $y' \approx 0$, das Wachstum stagniert.

Aus $y' = \lambda y - (\lambda/K)y^2$ folgt $y'' = \lambda y' - 2(\lambda/K)yy'$. Für $0 < y < K$ haben wir $y' > 0$, also $y'' > 0$ für $0 < y < K/2$ und $y'' < 0$ für $K/2 < y < K$. Bis zur Hälfte der Maximalgröße haben wir demnach beschleunigtes Wachstum ($y'' > 0$), oberhalb der Hälfte gebremstes Wachstum ($y'' < 0$).

(6) Für $0 < y < K$ gilt $y' > 0$, wir erwarten daher $y(x) \nearrow K$ für $x \rightarrow \infty$.

Dank Bolzano–Weierstraß konvergiert $y(x)$ für $x \rightarrow \infty$. Sei $c = \lim_{x \rightarrow \infty} y(x)$ der Grenzwert. Aus $y'(x) = \lambda y(x)(1 - y(x)/K)$ folgt $\lim_{x \rightarrow \infty} y'(x) = \lambda c(1 - c/K)$. Dieser Wert muss Null sein, andernfalls wäre $y'(x) \geq m > 0$ für $x \geq x_0$, und $y(x) \geq m(x - x_0)$ würde die Schranke K überschreiten. Also gilt $\lambda c(1 - c/K) = 0$, das heißt $c = 0$ oder $c = K$.

Für $0 < y_0 < K$ haben wir also tatsächlich Konvergenz $y(x) \nearrow K$ für $x \rightarrow \infty$.

Die logistische Differentialgleichung

😊 Die vorhergehenden Überlegungen klären das qualitative Verhalten.

(7) Wir lösen die logistische Gleichung $y'(x) = \lambda y(x) - (\lambda/K)y(x)^2$ schließlich explizit. Sie ist vom Bernoulli–Typ [M413](#): Wir substituieren deshalb $v(x) = y(x)^{-1}$ und erhalten eine lineare DG für $v(x)$:

$$v'(x) = -y(x)^{-2} y'(x) = -\lambda y(x)^{-1} + \lambda/K = \lambda/K - \lambda v(x)$$

Diese wird gelöst durch $v(x) = 1/K - c e^{-\lambda x}$, analog zu [M401](#), also:

$$y(x) = \frac{1}{v(x)} = \frac{1}{1/K - c e^{-\lambda x}}$$

Der Anfangswert $y(0) = y_0$ bestimmt $c = 1/K - 1/y_0$. Wir erhalten:

$$y(x) = \frac{K}{1 + (K/y_0 - 1) e^{-\lambda x}}$$

😊 Die Lösung gelingt leicht — jedoch erst mit passenden Methoden.

😊 Machen Sie die Probe durch Einsetzen in die Differentialgleichung!

😊 Geduldige Kurvendiskussion bestätigt alle Vorhersagen aus (2–6).

😊 Diese Gleichung tritt auch beim Massenwirkungsgesetz auf. [O153](#)
Dort lösen wir sie alternativ durch Separation und Partialbruchzerlegung.

In günstigen Fällen lässt sich $y' = f(x, y)$ vereinfachen und lösen durch eine geschickte Substitution $y(x) = \varphi(v(x))$ und $y'(x) = \varphi'(v(x)) v'(x)$.

Beispiel: Seien $a, b, c \in \mathbb{R}$ Konstanten. Zu lösen sei die DG

$$y' = f(ax + by + c).$$

Für $v(x) = ax + by(x) + c$ gilt $v'(x) = a + by'(x) = a + bf(v(x))$, also

$$v' = a + bf(v).$$

😊 Diese DG in v ist separierbar und kann so gelöst werden. M118

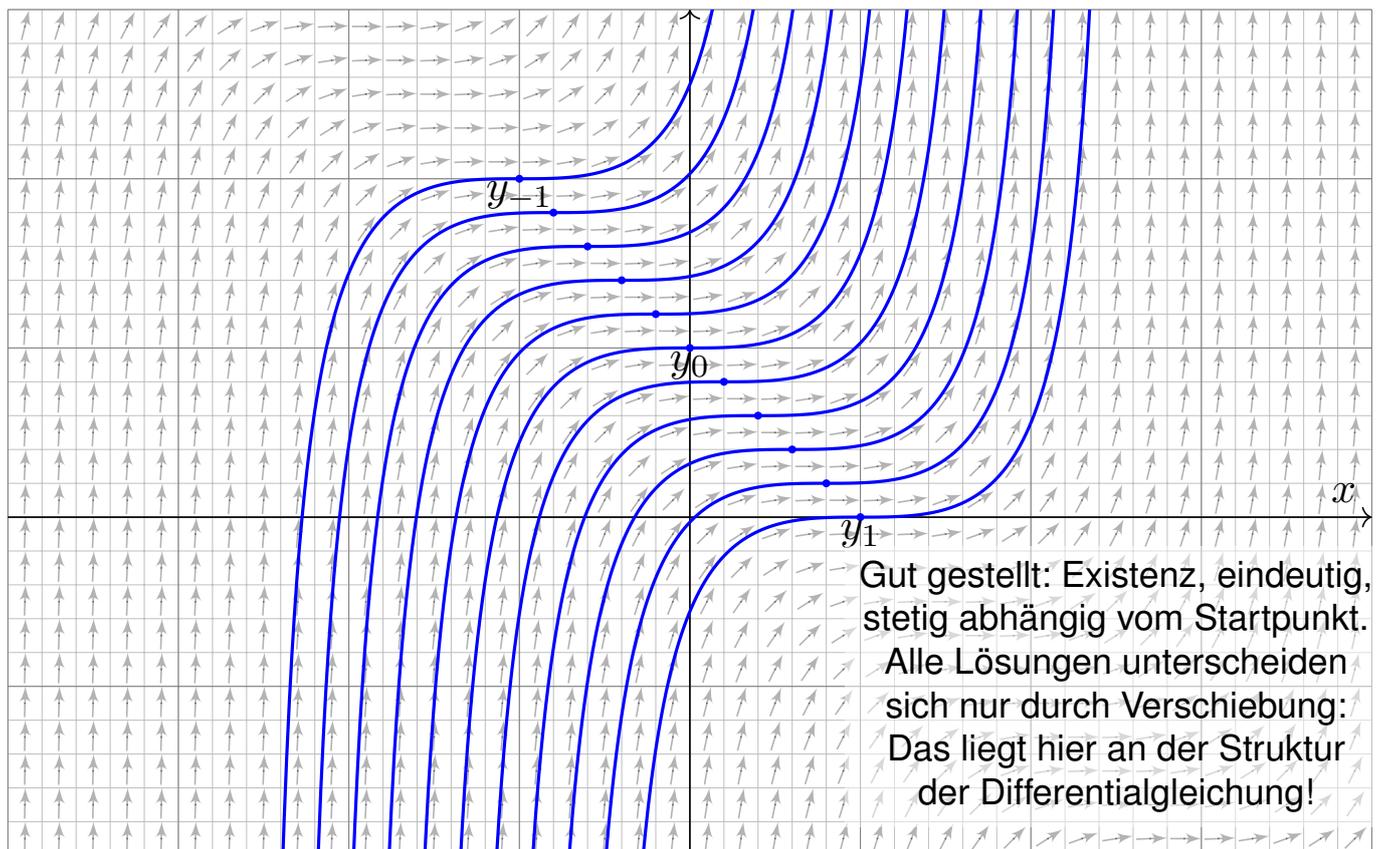
Aufgabe: Bestimmen Sie alle Lösungen von $y' = (x + y - 1)^2$.
Maximales Definitionsintervall? Sind alle AWP $y(x_0) = y_0$ gut gestellt?

Lösung: Die Substitution $v = x + y - 1$ führt zu $v' = 1 + v^2$.
Separation $v'/(1 + v^2) = 1$ und Integration zu $\arctan(v) = x - c$
liefert $v = \tan(x - c)$ unter der Bedingung $x \in]c - \pi/2, c + \pi/2[$.
Rücksubstitution ergibt $y(x) = 1 - x + \tan(x - c)$. Probe!

😊 Damit sind alle Lösungen y gefunden. Durch jeden Punkt (x_0, y_0) geht genau eine Lösung: In diesem Beispiel sind alle AWP gut gestellt!

Skizze der gefundenen Lösungen

Lösungen $y_c :]c - \pi/2, c + \pi/2[\rightarrow \mathbb{R}$ mit $y_c(x) = 1 - x + \tan(x - c)$.



Eine **Ähnlichkeits-Differentialgleichung** ist von der Form

$$y' = f(y/x).$$

Hierbei muss $x \neq 0$ gelten. Für $y = xv$ gilt $y' = v + xv' = f(v)$, also

$$v' = \frac{f(v) - v}{x}.$$

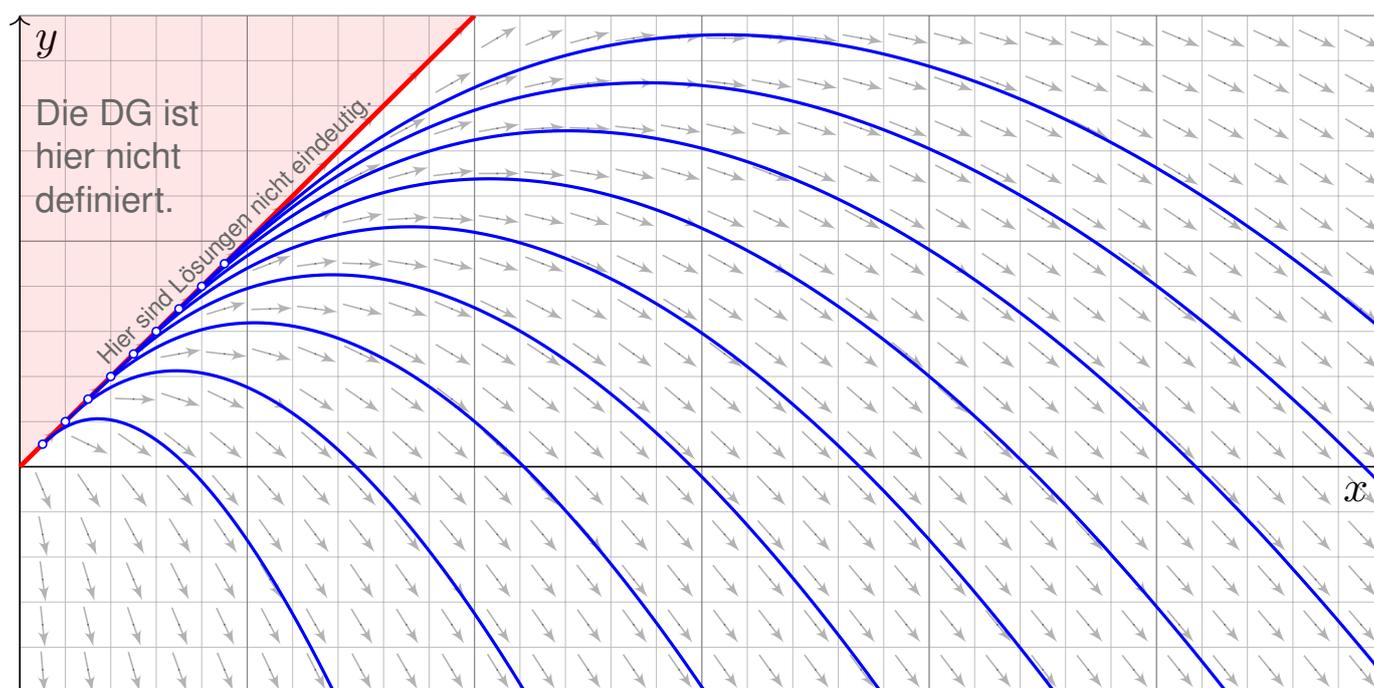
😊 Diese DG in v ist separierbar und kann so gelöst werden. M118
Hierbei wird durch $f(v) - v$ dividiert, also muss dies $\neq 0$ sein.

Aufgabe: Lösen Sie $y' = y/x - \sqrt{1 - y/x}$ für $x > 0$ und $y < x$.
Was ist zu jeder Lösung $y: I \rightarrow \mathbb{R}$ das maximale Definitionsintervall?
Erhalten wir zusätzliche Lösungen, wenn wir auch $y \leq x$ zulassen?

Lösung: Die Substitution $v = y/x$ führt zu $v' = -\sqrt{1 - v}/x$. Ausführlich:
Wir haben hier $f(v) = v - \sqrt{1 - v}$ und nutzen die obige Vorbereitung.
Separation $-v'/\sqrt{1 - v} = 1/x$ und Integration zu $2\sqrt{1 - v} = \ln x - \ln c$
liefert $v = 1 - \ln(x/c)^2/4$ unter der Bedingung $x > c > 0$.
Rücksubstitution ergibt $y(x) = x(1 - \ln(x/c)^2/4)$. Probe!

Skizze der gefundenen Lösungen

Lösungen $y_c:]c, \infty[\rightarrow \mathbb{R}$ mit $y_c(x) = x(1 - \ln(x/c)^2/4)$ und $c \in \mathbb{R}_{>0}$.



⚠️ Unsere Rechnung nutzt $x > 0$ und $y < x$: Hier gilt $v = y/x < 1$, und wir können durch $\sqrt{1 - v}$ dividieren. Durch jeden Anfangswert (x_0, y_0) mit $y_0 < x_0$ läuft genau eine Lösung. Im Sonderfall $v = 1$ ist auch $y(x) = x$ eine Lösung, wie man durch Einsetzen in die DG sieht. Durch jeden Anfangswert (x_0, y_0) mit $0 < x_0 = y_0$ laufen unendlich viele Lösungen!

Seien $a, b: I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, $n \neq 1$. Zu lösen sei die **Bernoulli–Gleichung**

$$y'(x) = a(x)y(x) + b(x)y(x)^n.$$

Im Falle $y \neq 0$ ist diese DG äquivalent zu $y'y^{-n} = a(x)y^{1-n} + b(x)$.
Für $v = y^{1-n}$ gilt $v' = (1-n)y'y^{-n}$. Wir erhalten so die lineare DG

$$\frac{1}{1-n}v'(x) = a(x)v(x) + b(x).$$

Aufgabe: Lösen Sie $y' = y/x - y^2$ für $x > 0$ mit $y(1) = 1$.

Lösung: Die Substitution $y = 1/v$ führt zu $v' = -v/x + 1$.

Diese DG in v ist linear mit $a(x) = -1/x$ und $b(x) = 1$. Wir finden $A(x) = -\ln x$. Der integrierende Faktor ist hier $e^{-A(x)} = x$, also

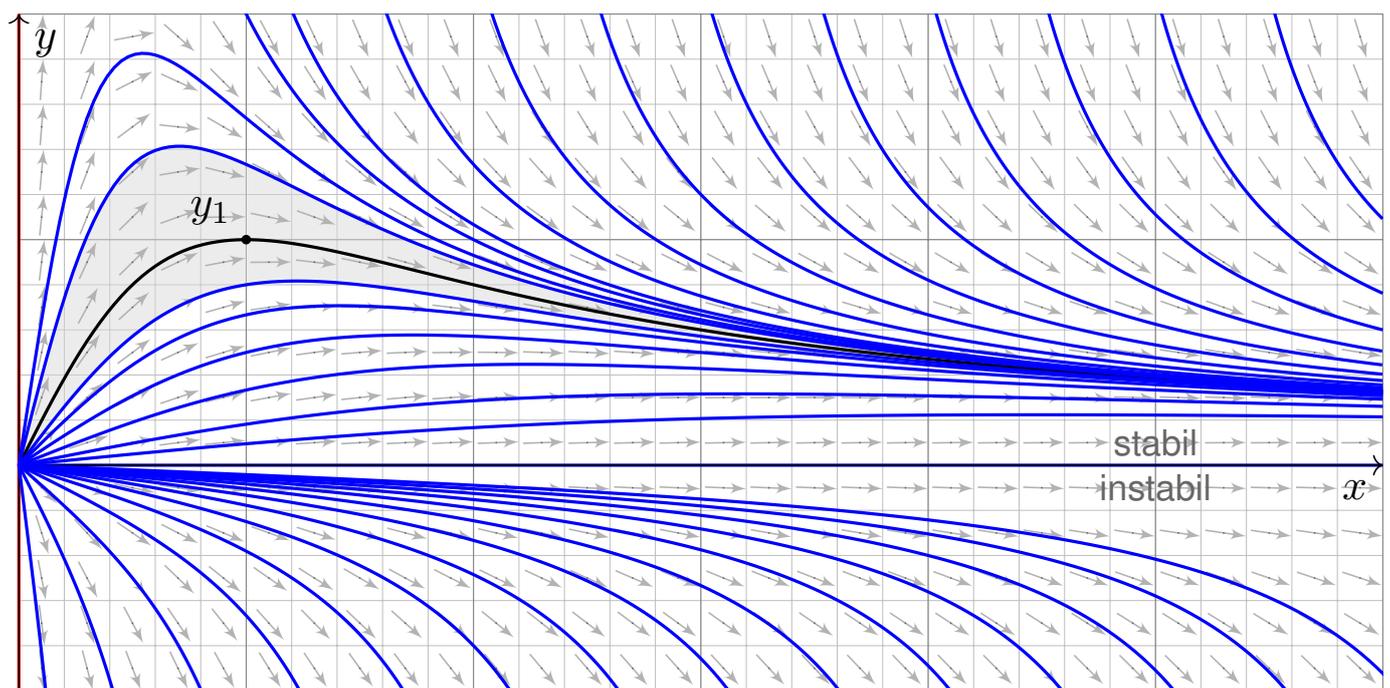
$$v(x) = e^{A(x)} \int e^{-A(x)} b(x) dx = \frac{1}{x} \int x dx = \frac{x^2 + c}{2x}.$$

Rücksubstitution ergibt $y(x) = 2x/(x^2 + c)$. Die Probe ist leicht!

Der Anfangswert $y(1) = 1$ bestimmt die Konstante $c = 1$.

Skizze der gefundenen Lösungen

Lösungen $y_c: \mathbb{R}_{>0} \setminus \{\sqrt{-c}\} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y_c(x) = 2x/(x^2 + c)$ und $c \in \mathbb{R}$.



😊 Wir können die Differentialgleichung $y' = y/x - y^2$ auch vereinfachen und qualitativ lösen:
Für kleine $x > 0$ ähnelt unsere DG $y' = y/x - y^2$ der Geradengleichung $y' = y/x$. [M119](#)
Für große $x \rightarrow \infty$ ähnelt unsere DG $y' = y/x - y^2$ eher der Gleichung $y' = -y^2$. [M113](#)
Das Ab- und Aufrunden einer Differentialgleichung ist oft eine hilfreiche Technik. [M445](#)

Aufgabe: Bestimmen Sie alle Lösungen $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ der DG

$$y' = \frac{3}{2} x^2 y^3 \quad \text{mit} \quad y(0) = 1.$$

Maximales Definitionsintervall? Sind alle AWP $y(x_0) = y_0$ gut gestellt?

Lösung: Für $y > 0$ separieren wir $-2y'/y^3 = -3x^2$ und integrieren:

$$\int -2 \frac{y'(x)}{y^3(x)} dx = \int -3x^2 dx + \text{const}$$

$$\implies y(x)^{-2} = c^3 - x^3 \quad \text{mit} \quad c \in \mathbb{R}$$

Auflösen nach y ergibt die Lösungen

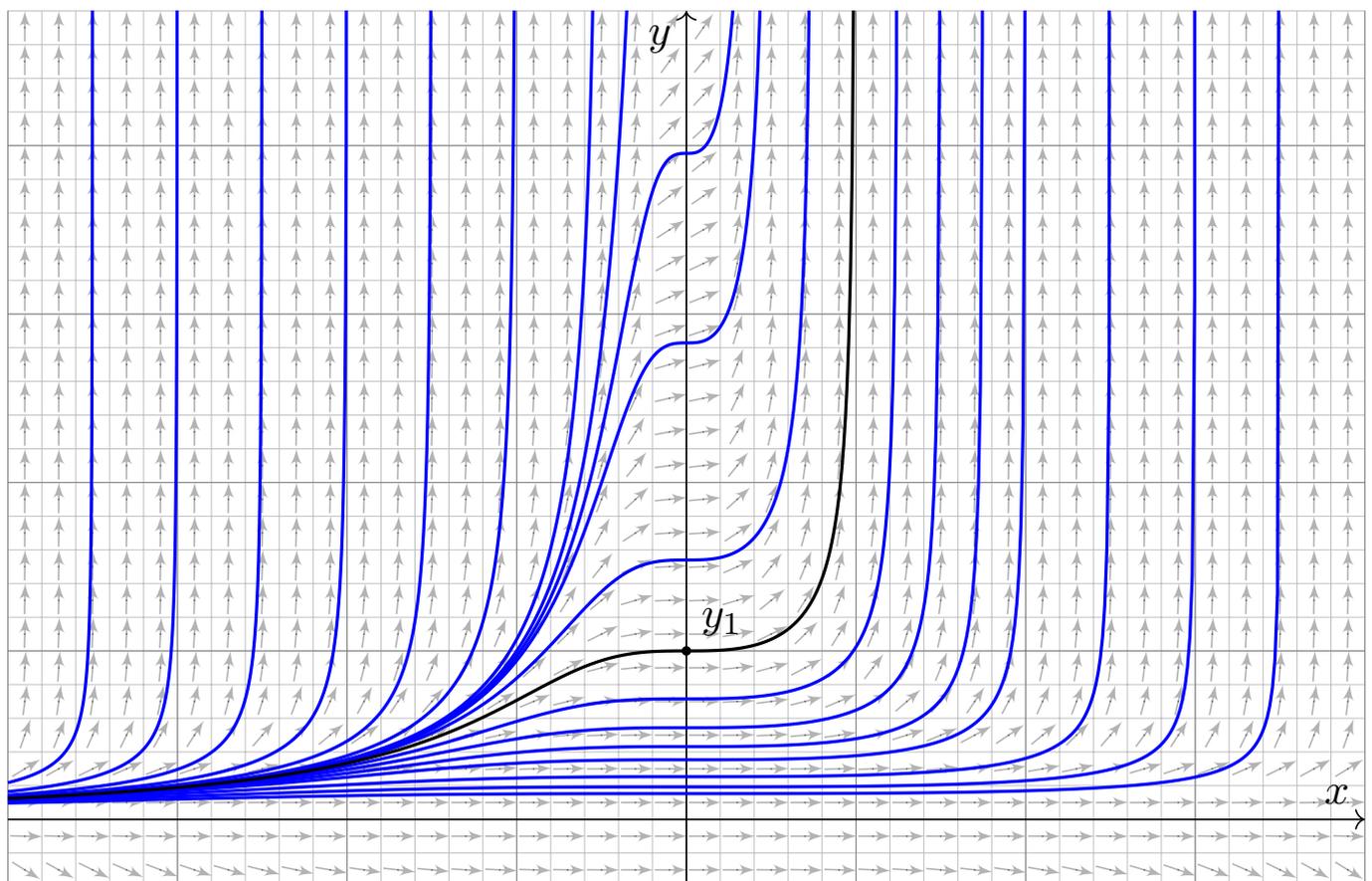
$$y_c :]-\infty, c[\rightarrow \mathbb{R} \quad \text{mit} \quad y_c(x) = \frac{1}{\sqrt{c^3 - x^3}}.$$

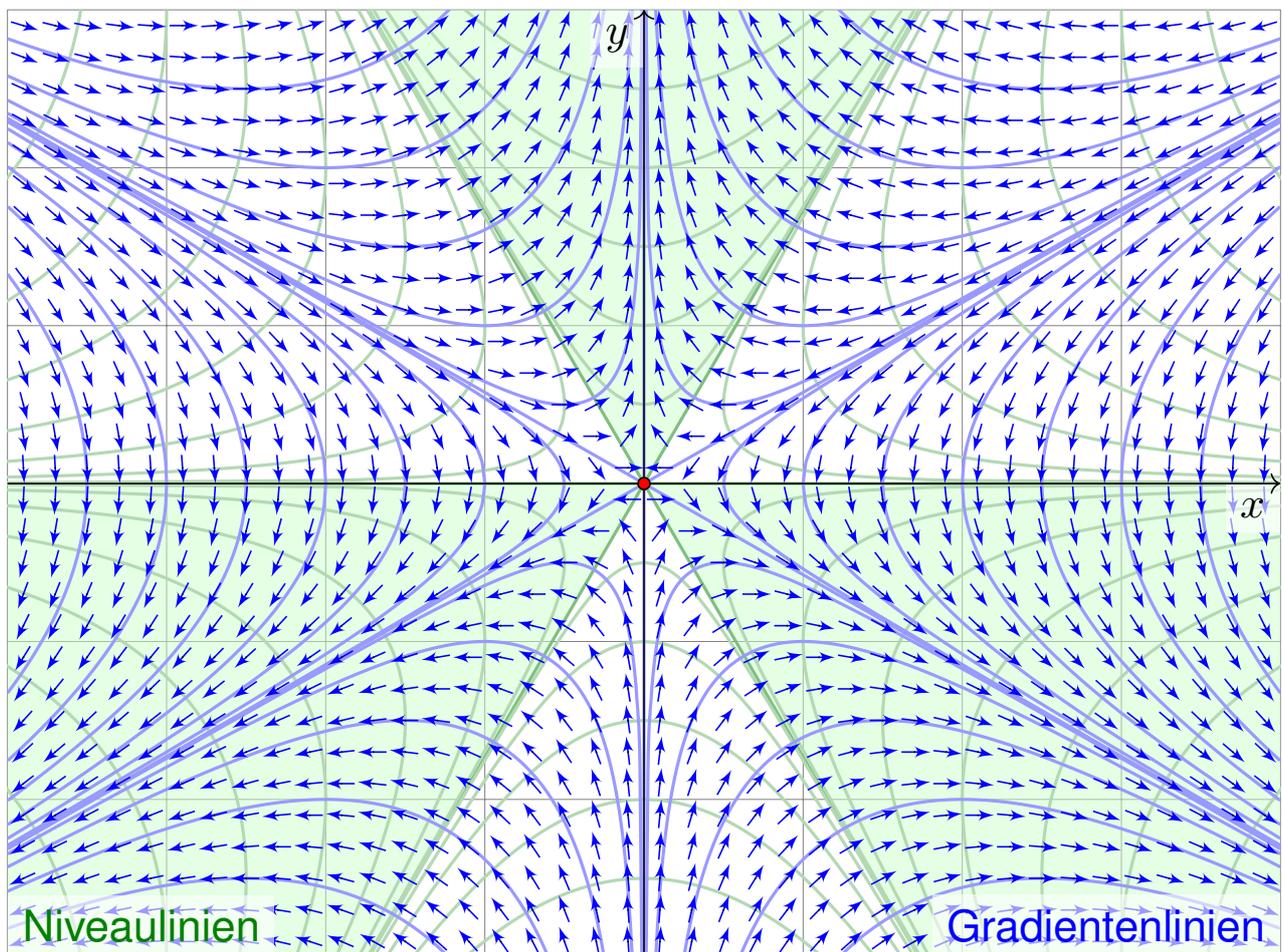
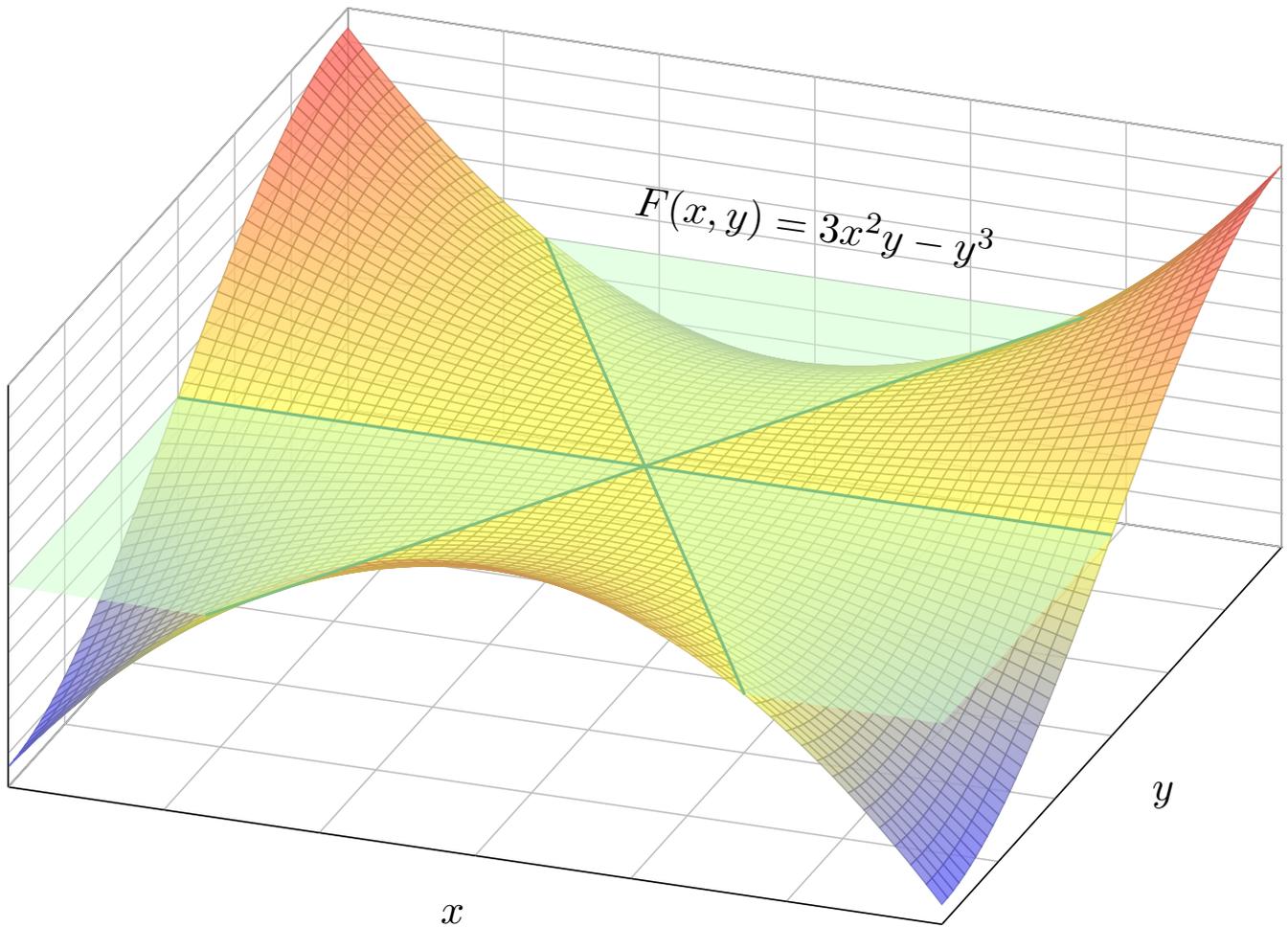
Die Lösung y_c existiert nur für $x < c$; bei $x = c$ liegt eine Polstelle vor!
Probe! Der Anfangswert $y(0) = 1$ bestimmt den Parameter $c = 1$.

! Weitere Lösungen sind 0 und $-y_c$. Durch jeden Punkt $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ geht genau eine Lösung: In diesem Beispiel sind alle AWP gut gestellt!

Skizze der gefundenen Lösungen

Lösungen $y_c :]-\infty, c[\rightarrow \mathbb{R}$ mit $y_c(x) = 1/\sqrt{c^3 - x^3}$ und $c \in \mathbb{R}$.





Der Graph der Polynomfunktion $F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}: (x, y) \mapsto 3x^2y - y^3$ ist der berühmte **Affensattel**. Die zweite Skizze zeigt das (normierte negative) Gradientenfeld $G = -\text{grad } F / |\text{grad } F|$. Demnach weist $G(x, y)$ in jedem Punkt $(x, y) \neq (0, 0)$ in Richtung des steilsten Abstiegs auf der Fläche.

Übung: Wir untersuchen $F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}: (x, y) \mapsto ax^2y - y^3$ mit $a \in \mathbb{R}$.

- (1) Berechnen Sie zu F das Gradientenfeld $\text{grad } F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$.
- (2) Finden Sie eine (möglichst einfache) Differentialgleichung für die Niveaulinien, also Kurven $x \mapsto y(x)$, die stets auf gleicher Höhe bleiben. Ist diese Differentialgleichung exakt? Mit welchem Potential?
- (3) Finden Sie eine (möglichst einfache) Differentialgleichung für die Gradientenlinien, also Kurven $x \mapsto y(x)$, die stets dem steilsten Abstieg folgen. Interpretieren Sie dies geometrisch und physikalisch-dynamisch. Ist diese Differentialgleichung exakt? Mit welchem Potential?
- (4) Für welche (zweimal diff'baren) Funktionen $F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ist neben der Niveaugleichung (2) auch die Gradientengleichung (3) eine exakte DG? Wie hängt das zusammen mit harmonischen / holomorphen Funktionen?

Der Ritt auf dem Affensattel: die Rechnung

Übung: Sei $a \in \mathbb{R}_{>0}$. Zu lösen ist die implizite Differentialgleichung

$$3y^2 - ax^2 + 2axy \cdot y' = 0 \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0.$$

Die vorige Aufgabe erklärt die geometrisch-physikalische Anschauung. Das kann Ihnen helfen! Der wichtige Spezialfall $a = 3$ entspricht einer Potentialströmung. Wir untersuchen hier $a > 0$. Diese Gleichung ist auf ganz \mathbb{R}^2 definiert. Unsere Rechnung zwingt uns zu Fallunterscheidungen, wir müssen dann geeignet einschränken und konzentrieren uns daher auf $x > 0$ und $y > 0$. Die anderen Fälle sind analog, für die Sonderfälle $x = 0$ oder $y = 0$ müssen wir genauer hinsehen.

- (1) Formulieren Sie diese DG in expliziter Form. Für welche Startpunkte (x_0, y_0) garantiert der \exists &E-Satz eine eindeutige Lösung? (Und sonst?)
- (2) Lösen die Geraden $y_{\pm}(x) = \pm cx$ mit $c := 1/\sqrt{2 + 3/a}$ unsere DG? Begründen oder widerlegen Sie folgende Schranke: Aus $|y(x_0)| < cx_0$ für ein $x_0 \in I$ folgt $|y(x)| < cx$ für alle $x \in I$, also $y_- < y < y_+$ auf I . Was bedeutet das geometrisch-physikalisch in den obigen Graphiken?
- (3) Lösen Sie die Differentialgleichung mit einer unserer Methoden:
 - (a) durch einen integrierenden Faktor (ausgehend von der impliziten DG),
 - (b) als Ähnlichkeitsdifferentialgleichung (durch Substitution $u = y/x$),
 - (c) als Bernoulli-DG (durch Substitution $v = y^{1-n}$ mit geeignetem n).

Aufgabe: Lösen Sie die Differentialgleichung

$$1 - 2xy^2 + 2(1 - x^2)y y' = 0 \quad \text{mit} \quad y(0) = 1.$$

Ist sie exakt? Was ist die maximale Lösung? Inwiefern ist diese stabil? Was bewirkt eine kleine Störung des Anfangswerts $y(0) = 1 \pm \varepsilon$?

Lösung: Diese DG ist exakt: $\text{rot} = 0$. (Wäre sie noch nicht exakt, so suchen wir zuerst einen integrierenden Faktor.) Sie ist Ableitung von

$$x + (1 - x^2)y^2 = c, \quad c \in \mathbb{R}.$$

Machen Sie die Probe! (Sie wissen bereits, wie man solche Potentiale ausrechnet; so gelingt es auch hier. Übung!) Auflösen nach y ergibt:

$$y(x) = \pm \sqrt{\frac{c - x}{1 - x^2}} \quad \text{für} \quad -1 < x < \min\{1, c\}$$

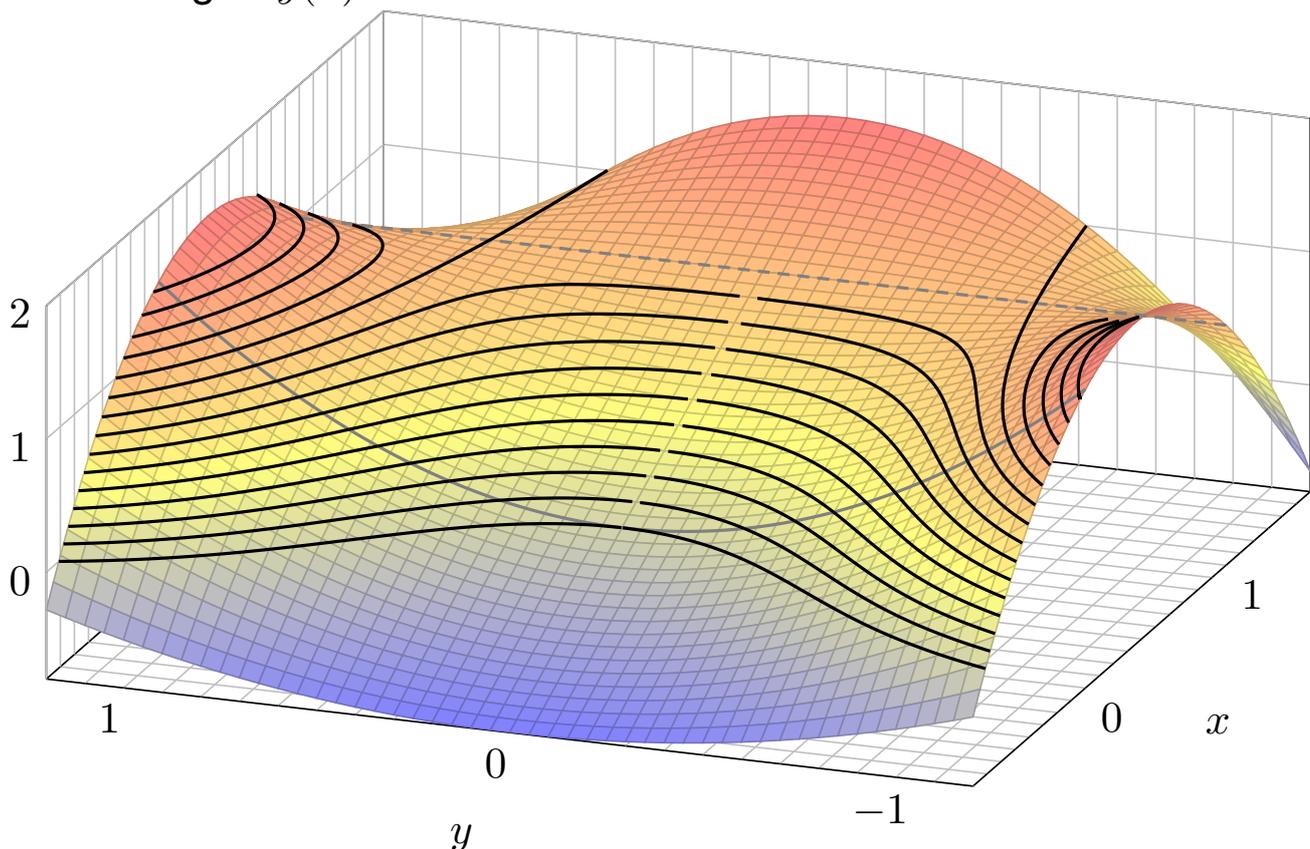
Das AWP $y(0) = 1$ wird gelöst für $c = 1$. Die maximale Lösung ist hier

$$y:]-1, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}, \quad y(x) = \frac{1}{\sqrt{1+x}}.$$

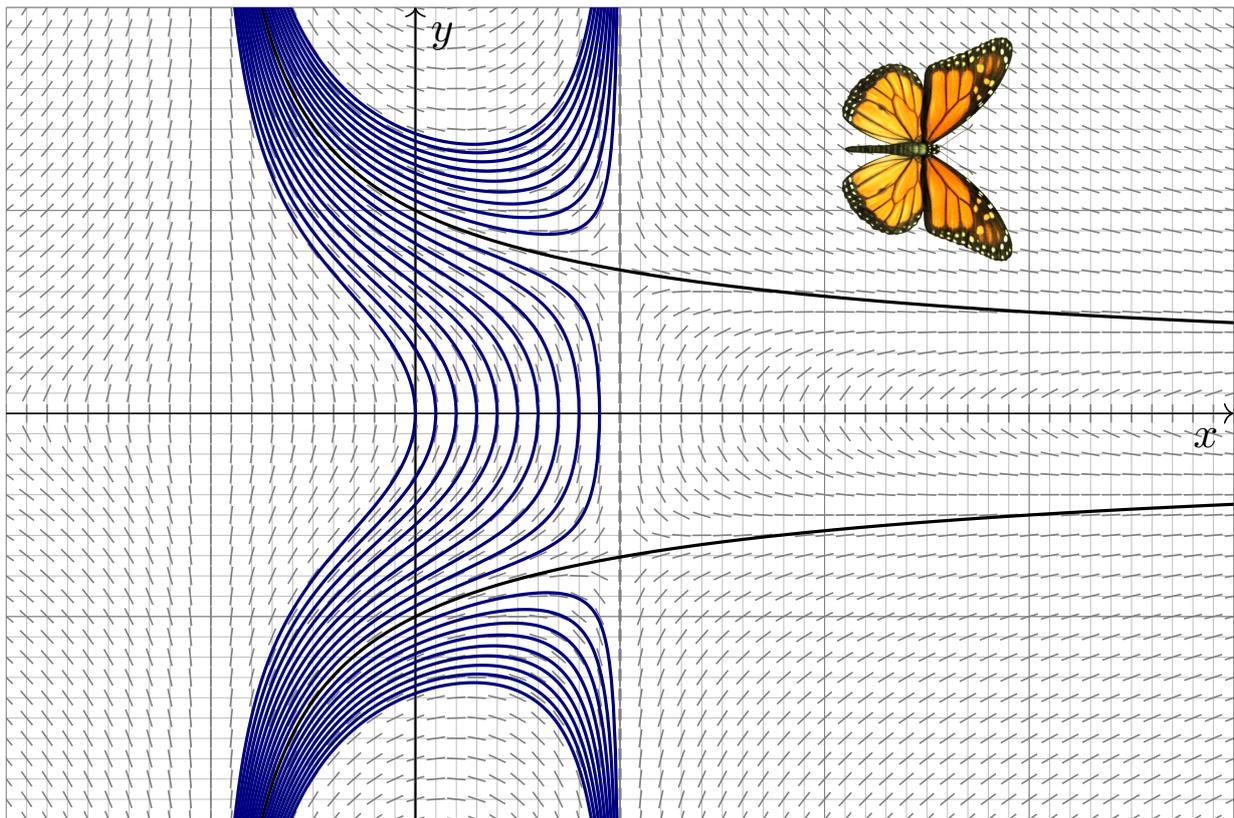
Machen Sie die Probe durch Einsetzen in unsere Differentialgleichung!

Exakte Differentialgleichungen und Potentiale

Das Potential $\Phi(x, y) = x + (1 - x^2)y^2$ lässt sich veranschaulichen: Die Lösungen $y(x)$ der DG sind die Niveaulinien des Potentials Φ .



Lösungen $y(x) = \pm \sqrt{(c-x)/(1-x^2)}$ zu Anfangswerten $y(0) = y_0$:



Exakte Differentialgleichungen und Potentiale

Anfangsdaten sind oft zufälligen kleinen Schwankungen unterworfen, etwa durch kleine äußere Störungen oder ungenaue Messdaten.

Wir sehen hier eine Illustration des berühmten Schmetterlingseffekts. Der Verlauf der Lösung hängt empfindlich vom Startwert $y_0 = y(0)$ ab:

- Zu $|y_0| > 1$ existiert die Lösung nur für $-1 < x < 1$ und läuft dann in die Polstelle bei $x = \pm 1$.
- Zu $0 < |y_0| < 1$ existiert die Lösung nur für $-1 < x \leq \sqrt{|y_0|}$, danach wird der Radikand negativ.

Nur für $y_0 = \pm 1$ existiert die Lösung $y(x) = \pm 1/\sqrt{1+x}$ für alle $x > -1$.

Was sagt das über die Stabilität von Lösungen unter kleinen Störungen? Lösungen durch benachbarte Punkte haben nur endliche Lebenszeit: Entweder sie explodieren bei $x = 1$ oder sie kollabieren schon zuvor.

⚠ Wenn diese DG ein physikalisches System beschreibt, etwa ein kritisches Bauteil eines Flugzeugs, dann haben Sie Grund zur Sorge! Daher fordern wir Stetigkeit / Stabilität für gut gestellte Probleme (M1B).

Aufgabe: Lösen Sie die Differentialgleichung

$$x \sin(y) y' = x + \cos(y) \quad \text{mit} \quad y(1) = y_0 \in [0, \pi].$$

Ist sie exakt? Was ist die maximale Lösung? Inwiefern ist diese stabil? Was bewirkt eine kleine Störung des Anfangswerts $y(1) = \frac{2}{3}\pi \pm \varepsilon$?

Lösung: Wir prüfen diese DG auf Exaktheit:

$$\underbrace{[x + \cos(y)]}_{f(x, y)} + \underbrace{[-x \sin(y)]}_{g(x, y)} y' = 0$$

Hierzu muss die Rotation $\text{rot}(f, g) = \partial_x g - \partial_y f$ verschwinden:

$$\frac{\partial g}{\partial x}(x, y) = -\sin y, \quad \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = -\sin y.$$

😊 Wir haben Glück, diese DG ist exakt: $\text{rot}(f, g) = 0$. (Wäre sie noch nicht exakt, so müssten wir zuerst einen integrierenden Faktor suchen.)

😊 Das Gebiet \mathbb{R}^2 ist einfach-zusammenhängend. Also hat unser Vektorfeld $(f, g) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ ein Potential $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Es bleibt uns nun, eins zu berechnen... Diese Fragestellung können Sie bereits lösen!

Integration: Wegen $\partial_x \Phi(x, y) \stackrel{!}{=} f(x, y) = x + \cos y$ versuchen wir

$$\Phi(x, y) = \int x + \cos y \, dx = \frac{1}{2}x^2 + x \cos y + c(y).$$

Die Integrationskonstante $c(y)$ hängt nur von y ab. Weiterhin:

$$\partial_y \Phi(x, y) = -x \sin y + c'(y) \stackrel{!}{=} g(x, y) = -x \sin y$$

Aus $c'(y) = 0$ folgt $c(y) = \text{const.}$ So finden wir das Potential

$$\Phi(x, y) = \frac{1}{2}x^2 + x \cos y \quad (+\text{const.}) \quad (\text{Probe!})$$

Auflösen von $\Phi(x, y) = c$ nach y ergibt $\cos y = c/x - x/2$, also

$$y(x) = \arccos\left(\frac{c}{x} - \frac{x}{2}\right). \quad (\text{Probe!})$$

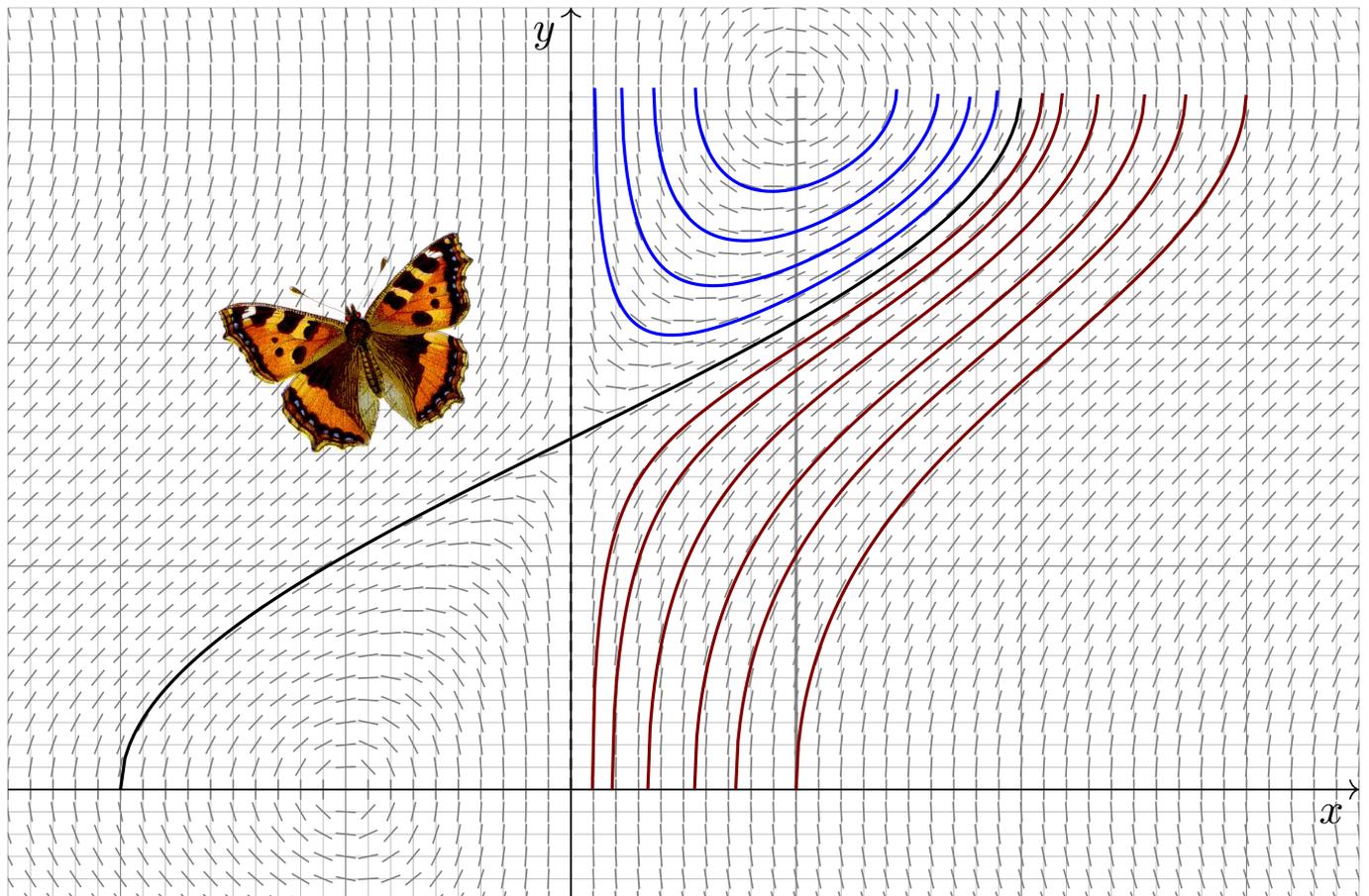
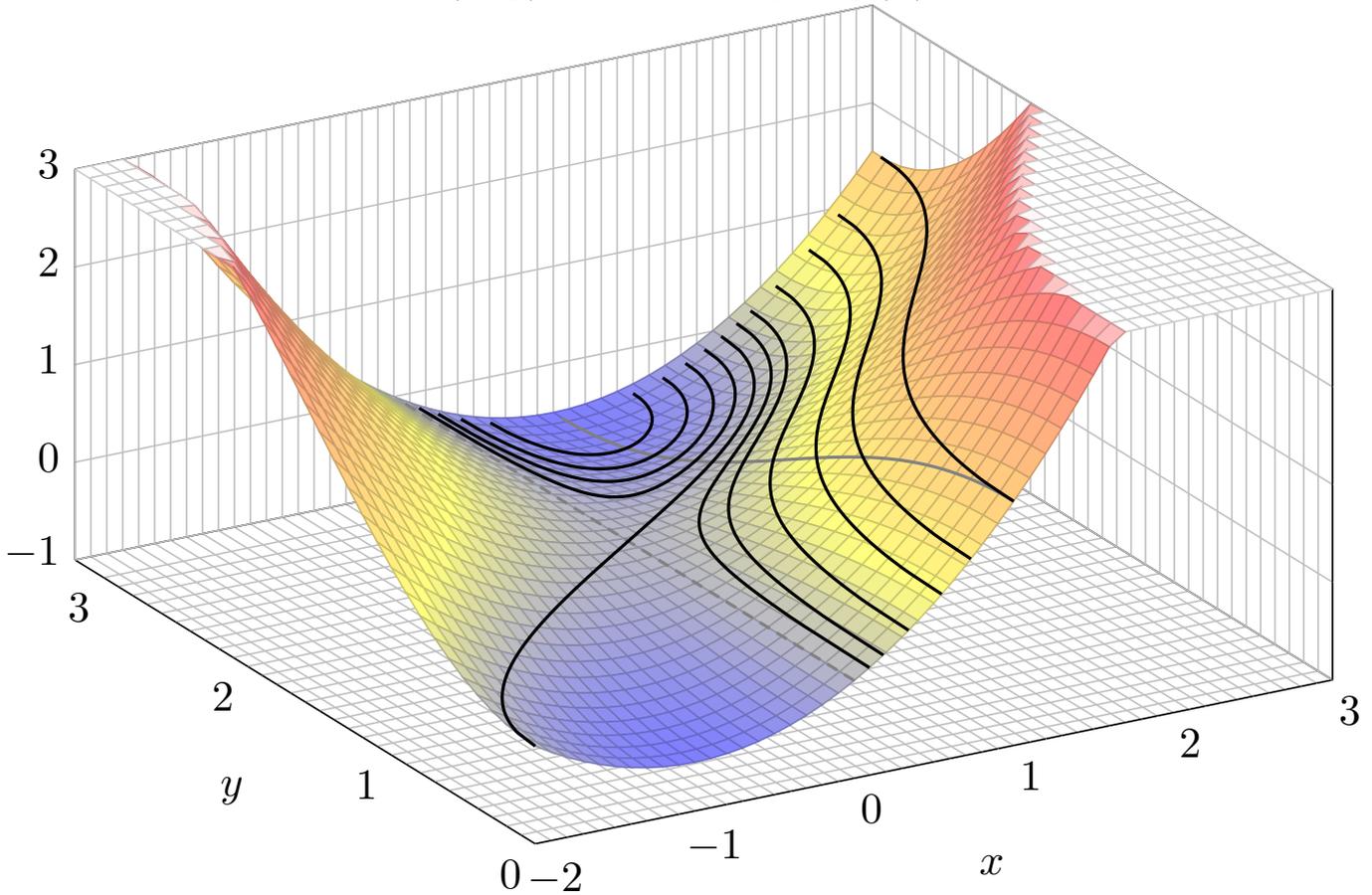
Der Anfangswert $y(1) = y_0 \in [0, \pi]$ bestimmt $c = \frac{1}{2} + \cos(y_0) \in [-\frac{1}{2}, \frac{3}{2}]$.

Für $c = 0$ existiert die Lösung $y(x) = \arccos(-x/2)$ für $x \in [-2, +2]$.

Für $-\frac{1}{2} \leq c < 0$ existiert die Lösung nur für $x \in [1 \mp \sqrt{2c+1}] \subseteq [0, 2]$.

Für $0 < c \leq \frac{3}{2}$ existiert die Lösung für $x \in [\sqrt{2c+1} \mp 1]$. (Skizze!)

Skizze des Potentials $\Phi(x, y)$. Die Lösungen $y(x)$ sind die Niveaulinien!



Aufgabe: Lösen Sie die Differentialgleichung

$$\boxed{[y - \cos(x)] y y' = -\sin(x) y^2 \quad \text{mit} \quad y(0) = 3.}$$

Ist sie exakt? Existiert ein integrierender Faktor? maximale Lösung?
Für welche Startwerte $y(0) = y_0$ existieren Lösungen $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$?

Lösung: Wir prüfen diese DG auf Exaktheit:

$$\underbrace{[\sin(x) y^2]}_{f(x, y)} + \underbrace{[y - \cos(x)] y y'}_{g(x, y)} = 0$$

Existiert ein Potential $\Phi: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\text{grad } \Phi = (f, g)$? Leider nein:

$$\partial_x g(x, y) = \sin(x) y, \quad \partial_y f(x, y) = 2 \sin(x) y, \quad \text{rot}(f, g) = -\sin(x) y \neq 0.$$

Wir suchen einen integrierenden Faktor $\lambda(x)$:

$$\frac{\lambda'(x)}{\lambda(x)} \stackrel{!}{=} -\frac{\text{rot}(f, g)}{g} = \frac{\sin(x) y}{y - \cos(x)} \implies \text{nicht lösbar}$$

☹ Die linke Seite hängt nur von x ab, die rechte auch noch von y .

Wir suchen einen integrierenden Faktor $\lambda(y)$:

$$\frac{\lambda'(y)}{\lambda(y)} \stackrel{!}{=} \frac{\text{rot}(f, g)}{f} = \frac{-1}{y} \implies \ln \lambda(y) = c - \ln y \implies \lambda(y) = \frac{C}{y}$$

Dank dieses Faktors $\lambda(y)$ erhalten wir die exakte Differentialgleichung

$$\boxed{[2 \sin(x) y] + 2[y - \cos(x)] y' = 0.}$$

Wir berechnen ein Potential Φ durch koordinatenweise Integration:

$$\partial_x \Phi(x, y) = 2y \sin(x) \implies \Phi(x, y) = c(y) - 2y \cos(x)$$

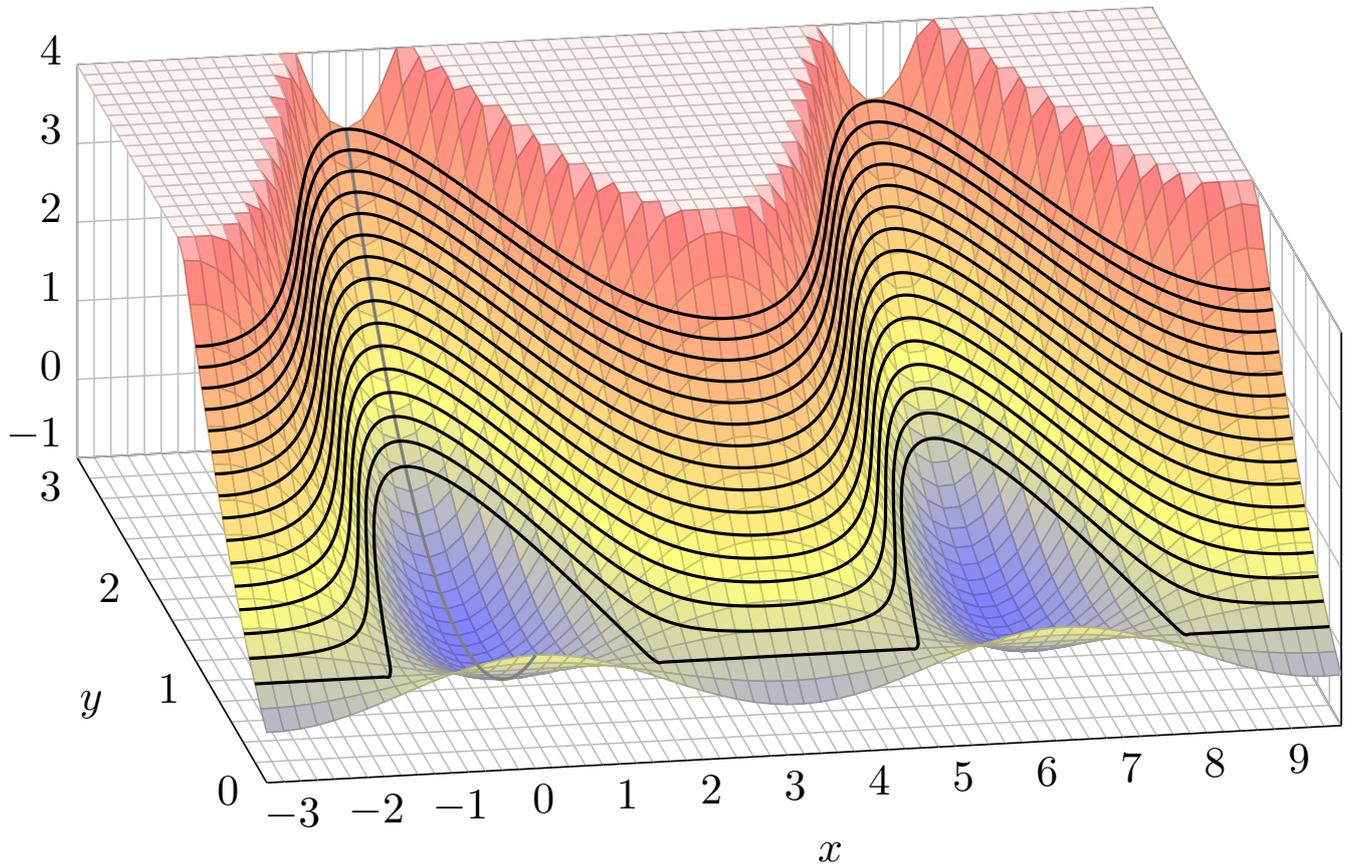
$$\partial_y \Phi(x, y) = 2y - 2 \cos(x) \implies \Phi(x, y) = y^2 - 2y \cos(x) \quad (+\text{const})$$

Lösungskurven erfüllen $y^2 - 2y \cos(x) = \Phi(x_0, y_0) = c$, also

$$y(x) = \cos(x) \pm \sqrt{\cos(x)^2 + c}.$$

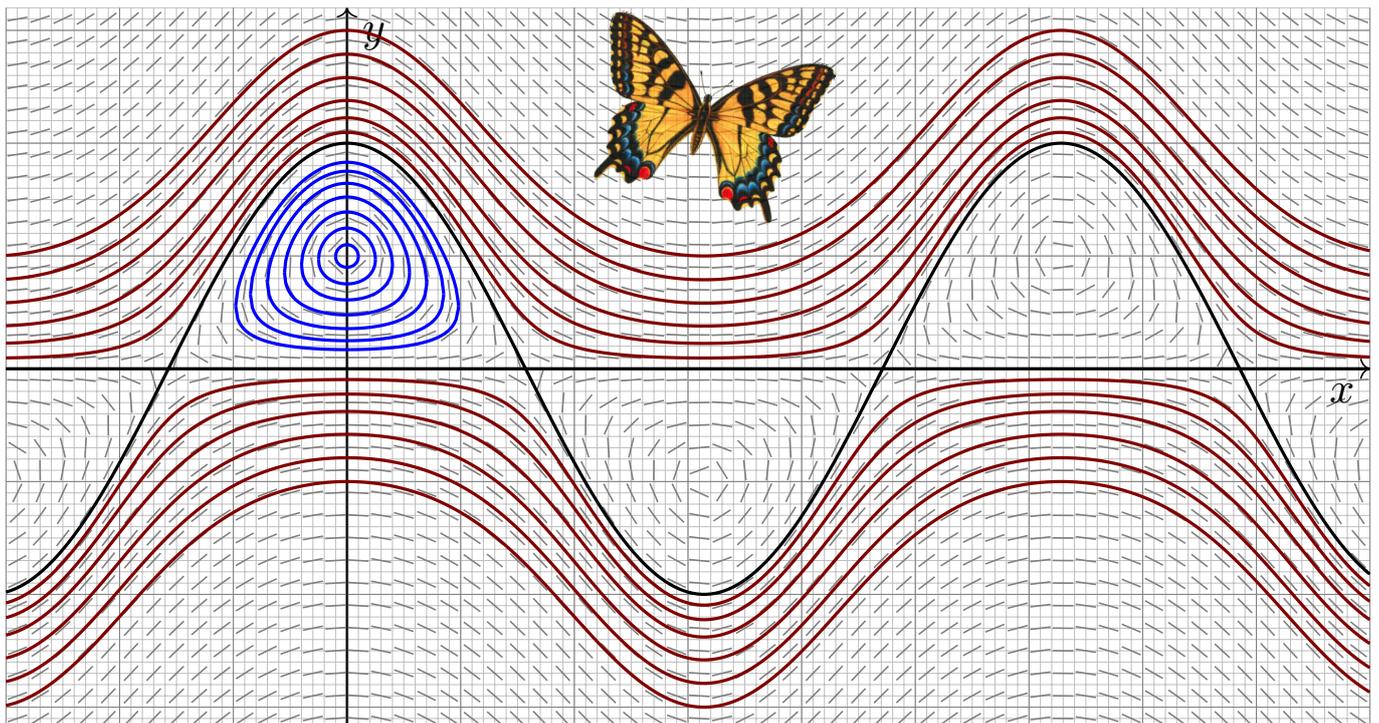
Der AW $y(0) = 3$ bestimmt den Parameter $c = 3$. Machen Sie die Probe!

😊 Diese und die vorige Aufgabe sind eng verwandt; sehen Sie wie?



⚠️ Auf dem kritischen Niveau $\Phi = 0$ kreuzen sich zwei Lösungskurven: Dort gilt Eindeutigkeit nicht, der \exists &E-Satz lässt sich nicht anwenden!

Lösungen $y(x) = \cos(x) \pm \sqrt{\cos(x)^2 + c}$ zu Anfangswerten $y(0) = y_0$:



😊 Zu $y(0) = y_0 \geq 2$ existiert genau eine Lösung $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, ebenso zu $y_0 \leq 0$, aber für $0 < y_0 < 2$ bleibt die Lösung im Potentialtopf gefangen!

Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall, hierauf $a, b: I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, $x_0 \in I$ und $y_0 \in \mathbb{R}$.
Zu lösen sei eine **lineare Differentialgleichung**, zunächst homogen

$$y'(x) = a(x) y(x) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0.$$

Die Lösung ist eindeutig (Satz M2D), und wir kennen sie explizit:

$$y(x) = e^{A(x)} y_0 \quad \text{mit} \quad A(x) = \int_{t=x_0}^x a(t) dt.$$

Zu lösen sei nun allgemeiner die **inhomogene Differentialgleichung**

$$y'(x) = a(x) y(x) + b(x) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0.$$

Das inhomogene Problem ist schwieriger: Wie finden wir eine Lösung? Gibt es ein allgemeines Verfahren? eine übersichtliche Lösungsformel? Wir haben dies oben mit einem integrierenden Faktor über eine exakte Differentialgleichung gelöst (Satz M2E). Lineare Differentialgleichungen treten häufig auf und sind daher recht wichtig. Zur Übung lösen wir die inhomogene Gleichung mit einer zweiten, nützlichen Rechenmethode.

Die Idee der **Variation der Konstanten** geht auf Lagrange zurück: Wenn $y_0(x) = e^{A(x)} c_0$ mit konstantem $c_0 \in \mathbb{R}$ die homogene DG löst, dann löst vielleicht der Ansatz $y(x) = e^{A(x)} c(x)$ die inhomogene DG.

😊 Das ist zunächst nur ein Ansatz, aber einen Versuch ist es wert!

Aufgabe: Setzen Sie $y(x) = e^{A(x)} c(x)$ ein und bestimmen Sie $c(x)$. Können Sie so die Existenz / Eindeutigkeit einer Lösung garantieren?

Lösung: Wir leiten den Ansatz ab; gemäß Produktregel erhalten wir

$$y'(x) = [e^{A(x)} c(x)]' = a(x) e^{A(x)} c(x) + e^{A(x)} c'(x).$$

Einsetzen in unsere Gleichung $y'(x) = a(x) y(x) + b(x)$ ergibt

$$a(x) e^{A(x)} c(x) + e^{A(x)} c'(x) \stackrel{!}{=} a(x) e^{A(x)} c(x) + b(x).$$

Vergleich beider Seiten liefert $e^{A(x)} c'(x) = b(x)$, also $c'(x) = e^{-A(x)} b(x)$.

😊 Wir erleben ein nützliches Wunder: Diese Differentialgleichung für die gesuchte Funktion c können wir direkt durch Integration lösen:

$$c(x) = \int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt + c(x_0)$$

Damit finden wir zu unserer inhomogenen Gleichung die Lösung

$$y(x) = e^{A(x)} c(x) = e^{A(x)} \left[\int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt + c(x_0) \right]$$

Zunächst können wir hierbei die Integrationskonstante $c(x_0)$ frei wählen. Wir passen sie schließlich den gegebenen Anfangsdaten $y(x_0) = y_0$ an: Für $x = x_0$ gilt $A(x_0) = 0$ und $y(x_0) = c(x_0)$; wir setzen also $c(x_0) = y_0$. Zusammenfassend erhalten wir erneut die Lösungsformel aus Satz M2E:

Die homogene DG $y'(x) = a(x) y(x)$ mit $y(x_0) = y_0$ wird gelöst durch $y_1(x) = e^{A(x)} y_0$ mit $A(x) = \int_{x_0}^x a(t) dt$. Zur inhomogenen Gleichung

$$y'(x) = a(x) y(x) + b(x) \quad \text{mit} \quad y(x_0) = y_0$$

finden wir durch Variation der Konstanten die Lösung $y: I \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$y(x) = e^{A(x)} \left[\int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt + y_0 \right].$$

😊 Diese Rechenmethode heißt „Variation der Konstanten“; das klingt widersinnig (Oxymoron), beschreibt aber sehr treffend unser Vorgehen.

😊 Sie zeigt die Existenz einer Lösung dank expliziter Lösungsformel. Die Ansatzmethode garantiert leider nicht die Eindeutigkeit der Lösung: Denkbar wären auch andere Ansätze und evtl. noch weitere Lösungen.

😊 Cauchys \exists &E-Satz M1C sichert hier die Eindeutigkeit — und auch die Existenz, dank expliziter Lösungsformel wissen wir noch mehr.

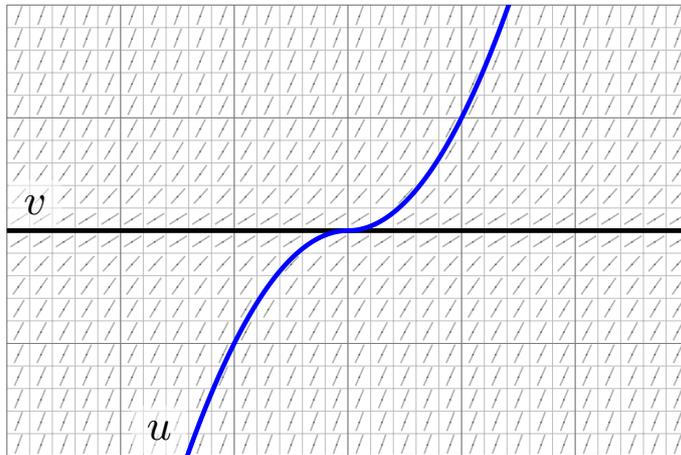
😊 Der Rechenweg mit einem integrierenden Faktor über eine exakte Differentialgleichung liefert dieselbe Lösungsformel und somit auch die Existenz; zudem liefert er die Eindeutigkeit als Dreingabe gratis mit.

Übung: Schreiben Sie beide Rechenwege selbständig auf (d.h. ohne Vorlage). Beide sind nahezu gleich, nur die Sichtweise ist verschieden.

😊 Exakte Differentialgleichungen stehen in höherer Dimension nicht mehr zur Verfügung, wohl aber die Variation der Konstanten. N311 O311

Das Ergebnis ist bemerkenswert: Dieser Kunstgriff gelingt immer!

Als Ingenieur:in wollen bzw. müssen Sie oft DGLen lösen!
 Bevor Sie vermeintlichen Lösungen (mit dem Computer) nachjagen,
 stehen Sie vor dem Grundproblem: Wie viele Lösungen gibt es?
 Wenn Sie dies ignorieren, dann stellen Sie sich die falschen Fragen!
 Und der Computer wird Ihnen numerische Halluzinationen vorgaukeln.



Kreuzung =
mehrdeutig!

Aufgabe: Wir untersuchen Funktionen $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y'(x) = 2 \cdot \sqrt{|y(x)|}$.
 Können sich Lösungen u, v kreuzen, von $u(-1) < v(-1)$ zu $u(1) > v(1)$?

Lösung: Erschreckend, aber ja! Zum Beispiel $v(x) = 0$ und $u(x) = x|x|$.

Zusatz: Führen Sie dies sorgsam aus. Zu jeder Lösung $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$
 gibt es Werte $a \leq b$ in $\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$, so dass $y(x) = 0$ für $a \leq x \leq b$ gilt,
 sowie $y(x) = -(a-x)^2$ für $x \leq a$ und $y(x) = (x-b)^2$ für $x \geq b$.

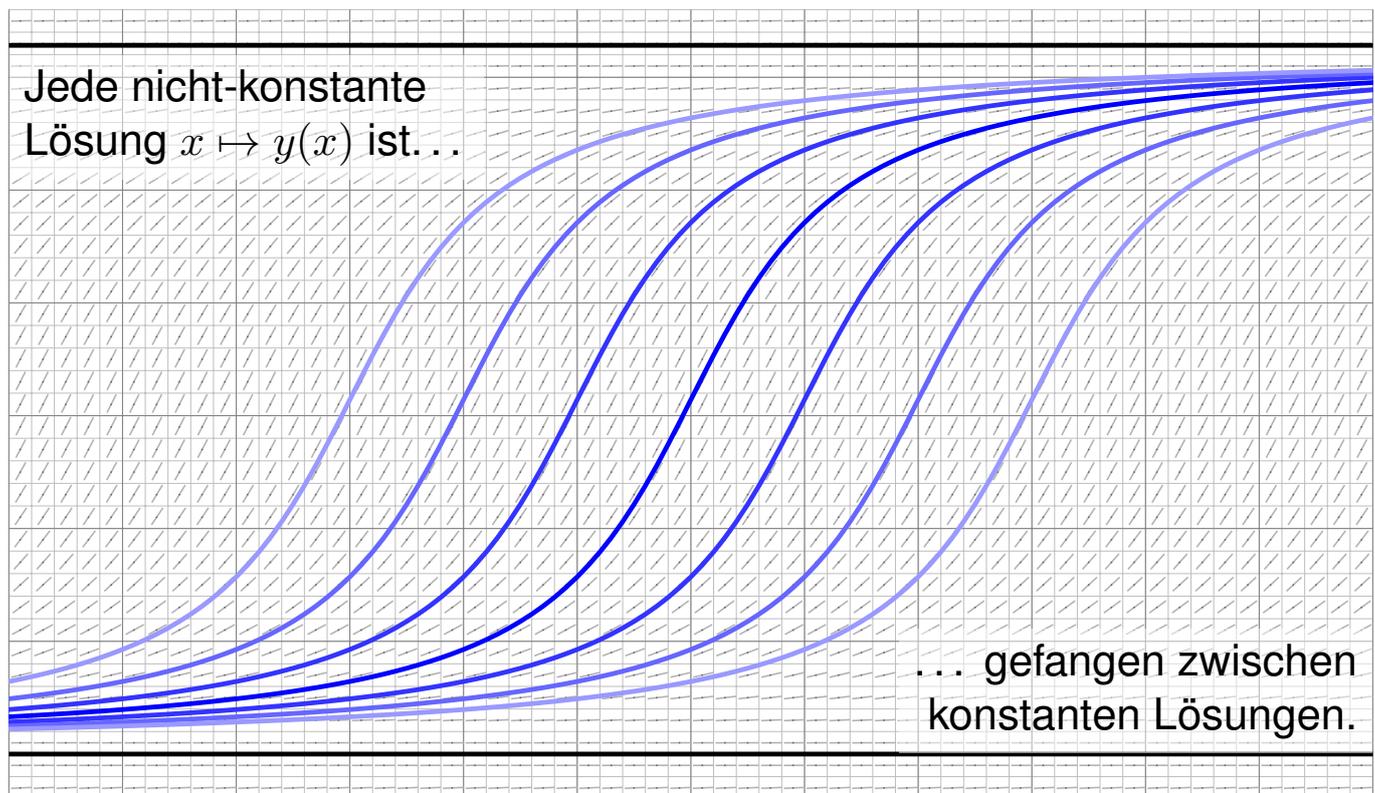
(1) Warum sind dies tatsächlich Lösungen? Machen Sie die Probe!

(2) Warum sind dies alle Lösungen? Nutzen Sie den $\exists\&E$ -Satz M1c!

😊 Meist wollen Sie nicht nur die Existenz, sondern auch und vor allem die Eindeutigkeit. Genau dazu nutzen Sie den $\exists\&E$ -Satz. Daraus folgt insbesondere, dass Überkreuzungen unmöglich sind. Hier jedoch ist der Satz nicht anwendbar! Unser Gegenbeispiel schafft wohlthuend Klarheit.

Fun fact: Im Februar 2025, anlässlich unserer Klausur, habe ich ChatGPT diese Aufgabe gestellt. Hierzu plauderte es fröhlich: „1. Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen. Da die rechte Seite der Differentialgleichung $f(y) = 2\sqrt{|y|}$ nicht lipschitz-stetig ist bei $y = 0$ (sie hat dort eine Singularität), kann der klassische Satz von Picard–Lindelöf nicht direkt auf globale Eindeutigkeit angewendet werden.“ Alle Achtung! „Dies bedeutet, dass es potenziell mehrere Lösungen für dieselbe Anfangsbedingung geben könnte.“ Kluge Worte, hier ist Vorsicht geboten! Nach einigen Rechnungen behauptet es jedoch frech: „4. Fazit. Da die Lösungen durch ihre Startwerte eindeutig bestimmt sind und keine zwei Lösungen mit $u(-1) < v(-1)$ zu $u(1) > v(1)$ übergehen können, können sich zwei Lösungen nicht kreuzen.“ Das ist nun offensichtlich falsch!

Aufgabe: (1) Ist jede Funktion $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y' = 1 - \cos(y)$ beschränkt?
 (0) Wie viele Lösungen y existieren zu jedem Startwert $y(x_0) = y_0$?



Lösung: (0) Die rechte Seite $f(y) = 1 - \cos(y)$ unserer Gleichung $y' = f(y)$ ist stetig differenzierbar nach y , also greift der $\exists\&E$ -Satz M1c.

(1) Wir haben die konstanten Lösungen $u_k(x) = 2\pi k$ für jedes $k \in \mathbb{Z}$. Jede andere Lösung y startet zwischen zwei konstanten Lösungen u_k und u_{k+1} , kann diese *nicht* kreuzen, bleibt also dazwischen beschränkt!

😊 Diese Differentialgleichung sieht schlimm aus, und das soll sie auch! Mit dem $\exists\&E$ -Satz gelingt dennoch alles schnell, leicht und effizient.

😊 Bonus: Als glücklicher Zufall lässt sich diese DG sogar explizit lösen, durch $y(x) = -2 \operatorname{arccot}(x - \cot(y(0)/2))$. Finden ist schwer, Probe leicht!

Fun fact: Im Februar 2025, anlässlich unserer Klausur, habe ich ChatGPT diese Aufgabe gestellt. „Die rechte Seite der Differentialgleichung ist gegeben durch $f(y) = 1 - \cos(y)$. Daraus folgt $0 \leq y'(x) \leq 2$. Das bedeutet, dass die Funktion $y(x)$ monoton wachsend ist. Zudem ist das Wachstum durch $y'(x) \leq 2$ nach oben beschränkt.“ So weit, so gut, doch dann halluziniert es: „Beispiel für eine unbeschränkte Lösung: Betrachten wir die Anfangsbedingung $y(0) = 0$. Dann haben wir $y'(0) = 1 - \cos(0) = 0$. Da $y'(x) \geq 0$, beginnt $y(x)$ zunächst mit einer horizontalen Tangente, wächst aber durch $y'(x) > 0$ für alle $y \neq 2\pi k$. Durch numerische oder qualitative Betrachtung kann man zeigen, dass $y(x)$ für große x gegen ∞ divergiert.“ Schade, das ist nun offensichtlich Unsinn. Hier kann sich die KI in den nächsten Jahren noch stark verbessern.

 Häufig lassen sich selbst einfache Differentialgleichungen nicht elementar lösen, also durch keine geschlossene Formel. Wir nutzen dann qualitative Garantien und anschließend numerische Näherungen.

Aufgabe: Vorgelegt sei eine explizite Differentialgleichung

$$y'(x) = f(x, y(x))$$

mit stetiger rechter Seite $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Begründen Sie durch ein Ergebnis der Vorlesung oder widerlegen Sie durch ein passendes Gegenbeispiel:

- (1) Ist die rechte Seite f elementar / linear / algebraisch / analytisch, so gilt dasselbe für jede Lösung $y : \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$ der Differentialgleichung.
- (2) Welche Form von Schranke für y folgt aus $|f(x, y)| \leq M \in \mathbb{R}$?
- (3) Läuft durch jeden Startpunkt $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ eine Lösung $y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$?
- (4) Welche zusätzlichen Bedingungen wären hier zu fordern / prüfen?
- (5) Können sich verschiedene Lösungen $u \neq v : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ schneiden? Gibt es gar kreuzende Lösungen u, v mit $u(a) < v(a)$ aber $u(b) > v(b)$?
- (6) Welche zusätzlichen Bedingungen wären hier zu fordern / prüfen?

Lösung: (1) Die DG $y' = y$ ist linear / algebraisch, die Lösung $y(x) = e^x$ aber nicht. Die rechte Seite von $y'(x) = e^{-x^2/2}$ ist elementar, die Lösung $y(x) = \int_0^x e^{-t^2/2} dt$ aber nicht.  Ist f jedoch analytisch, also lokal in eine konvergente Potenzreihe entwickelbar, so auch jede Lösung y .

(2) Für $x_1 < x_2$ in I gilt $y(x_1) - y(x_2) = \int_{x_1}^{x_2} y'(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} f(x, y) dx$, somit die Schranke $|y(x_1) - y(x_2)| \leq \int_{x_1}^{x_2} |f(x, y)| dx \leq M \cdot |x_1 - x_2|$.

(3) Nein, Lösungen können explodieren / in Polstellen laufen. M113 M409

(4) Für $|f(x, y)| \leq M$ oder allgemeiner $|f(x, y)| \leq a(x)|y| + b(x)$ M455 haben Lösungen $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $y'(x) = f(x, y(x))$ niemals Polstellen.

 Dank Existenzsatz M1c läuft durch jeden Startpunkt $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ mindestens eine maximale Lösung $y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Eventuell auch mehrere:

(5) Ja, ein Gegenbeispiel ist die Wasseruhr $y'(x) = -a\sqrt{y(x)}$. M123

Wir kennen weitere drastische Beispiele: M321 M325 M329 M411 M429 M437

(6) Die Stetigkeit der rechten Seite f genügt nicht, um die Eindeutigkeit von Lösungen zu gegebenen Anfangswerten $y(x_0) = y_0$ zu garantieren.

 Der Eindeutigkeitssatz M1c verlangt noch stetige Differenzierbarkeit von $f(x, y)$ nach y ; dann ist jedes Anfangswertproblem eindeutig lösbar!

Aufgabe: Skizzieren Sie das ebene Vektorfeld zur Differentialgleichung

$$y' = f(x, y) := \sin(y) \sqrt[3]{\cos(x)^2 / (1 + x + y)}.$$

Explizite Lösungen sind hier wohl kaum zu erwarten. Was tun Sie dann?

- (1) Lässt sich der \exists &E-Satz hier anwenden? Warum und wie genau?
- (2) Können sich verschiedene Lösungen $u \neq v: I \rightarrow \mathbb{R}$ schneiden?
- (3) Ist die konstante Nullfunktion $\tilde{y}(x) = 0$ eine Lösung dieser DG? Wie viele Nullstellen hat demnach jede andere Lösung $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$?
- (4) Für welche Startpunkte $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ ist jede Lösung konstant?
- (5) Für welche Startpunkte $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ ist jede Lösung beschränkt?
- (6) Durch welche Startpunkte $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ läuft eine Lösung $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$?
- (7) Welches Verhalten haben Lösungen $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ für $x \rightarrow \infty$?

Lösung: (1) Ja, der \exists &E-Satz M1c lässt sich hier anwenden. Genauer: Die rechte Seite $f(x, y)$ ist stetig und zudem in y stetig differenzierbar. (Zwar nicht in x , aber das wird von Satz M1c auch nicht gefordert.)

(2) Nein, verschiedene Lösungen können sich nicht schneiden!

Angenommen, für zwei Punkte $a < b$ in I gälte $u(a) < v(a)$ aber $u(b) \geq v(b)$.

Dank Zwischenwertsatz gilt Gleichheit $u(t) = v(t)$ für mindestens ein $t \in]a, b]$.

Dank Eindeutigkeit (1) wäre dann aber $u = v$, im Widerspruch zu $u(a) < v(a)$.

(3) Ja! Einsetzen ergibt sofort: Die Nullfunktion ist eine Lösung.

Dank (2) haben andere Lösungen demnach keine Nullstellen!

(4) Die rechte Seite verschwindet genau für $y = k\pi$ mit $k \in \mathbb{Z}$.

Jede konstante Funktion $y(x) = k\pi$ mit $k \in \mathbb{Z}$ löst $y' = f(x, y)$.

(5) Jede Lösung $y: [x_0, x_1[\rightarrow \mathbb{R}$ erfüllt $y_0 = y(x_0) \in [(k-1)\pi, k\pi[=: J$ für ein $k \in \mathbb{Z}$. Dank (2,4) bleibt $y(x)$ für alle x im Intervall J gefangen.

(6) Der \exists &E-Satz M1c garantiert die Existenz und Eindeutigkeit einer Lösung $y: I \rightarrow \mathbb{R}$ für ein (kleines) Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$. Dank (5) ist die Lösung y beschränkt, sie kann also insbesondere keine Polstellen entwickeln.

Dank M1c lässt sie sich in beide Richtungen fortsetzen zu $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$.

(7) Durch jeden Startpunkt $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ verläuft genau eine Lösung $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Diese ist beschränkt, denn sie verläuft ganz in $[(k-1)\pi, k\pi[$.

Wir betrachten ein Anfangswertproblem, wie üblich von der Form

$$y'(x) = f(x, y(x)), \quad y(x_0) = y_0.$$

- ☹ Oft können (oder wollen) wir Lösungen y nicht explizit ausrechnen.
 😊 Wir wollen (oder müssen) dann y wenigstens geschickt eingrenzen.

Aufgabe: (1) Lösen Sie für $x \geq 0$ das AWP $u'(x) = u(x)^2$, $u(0) = 1$:

(a) Finden Sie eine maximale Lösung $u: [0, x_1[\rightarrow \mathbb{R}$. Ist u eindeutig?

(b) Was ist hier die Intervallgrenze x_1 ? Was passiert für $x \nearrow x_1$?

(2) Lösen Sie für $x \geq 0$ ebenso das AWP $v'(x) = 1 + v(x)^2$, $v(0) = 1$.

(3) Untersuchen Sie qualitativ das AWP $y'(x) = x^2 + y(x)^2$, $y(0) = 1$.

Hinweis: Können Sie (3) ebenso leicht explizit lösen wie (1) und (2)?

Wie helfen (1,2) zur Eingrenzung von (3)? Formulieren Sie eine Regel!

Riccati-Gleichungen $y'(x) = a(x) + b(x)y(x) + c(x)y(x)^2$ bilden eine umfangreiche Klasse; sie enthält lineare $y'(x) = a(x) + b(x)y(x)$ und Bernoulli-DG $y'(x) = b(x)y(x) + c(x)y(x)^2$. Eine geschlossene Lösung durch elementare Funktionen ist im Allgemeinen nicht möglich. In solchen Fällen hilft die allgemeine Technik der Eingrenzung: einfach und effizient!

Lösung: (1a) Wir lösen $u'(x) = u(x)^2$. Die triviale Lösung ist $u = 0$. Für $u(x) > 0$ trennen wir die Variablen und integrieren:

$$\begin{aligned} \frac{u'(x)}{u(x)^2} = 1 &\implies \int \frac{u'(x)}{u(x)^2} dx = \int 1 dx + \text{const} \\ \implies -u(x)^{-1} = x + \text{const} &\implies u(x) = \frac{1}{c - x} \end{aligned}$$

Hierbei ist $c \in \mathbb{R}_{>0}$ eine Konstante und $u(0) = 1/c$. Durch den Startwert $u(0) = 1$ verläuft somit als einzige Lösung $u: [0, 1[\rightarrow \mathbb{R}: x \mapsto 1/(1-x)$.

(1b) Die Lösung explodiert in endlicher Zeit: Für $x \nearrow 1$ gilt $u(x) \nearrow \infty$.

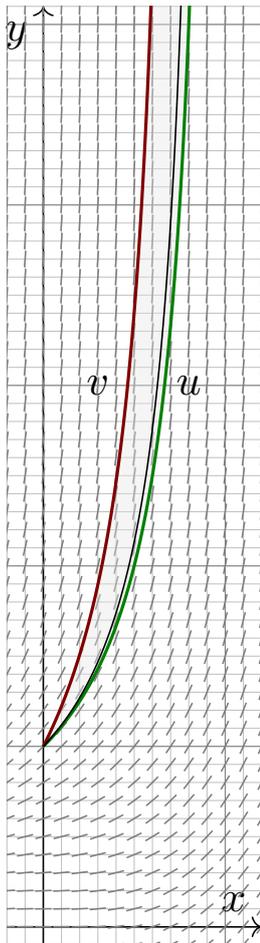
Das maximale Definitionsintervall ist $[0, 1[$ wegen der Polstelle in 1.

(2a) Auch für $v'(x) = 1 + v(x)^2$ trennen wir die Variablen und integrieren:

$$\begin{aligned} \frac{v'(x)}{1 + v(x)^2} = 1 &\implies \int \frac{v'(x)}{1 + v(x)^2} dx = \int 1 dx + \text{const} \\ \implies \arctan(v(x)) = x + \text{const} &\implies v(x) = \tan(x + c) \end{aligned}$$

Durch $v(0) = 1$ geht $v: [0, \frac{\pi}{4}[\rightarrow \mathbb{R}: x \mapsto \tan(x + \frac{\pi}{4})$ als einzige Lösung.

(2b) Diese Lösung explodiert noch schneller: Für $x \nearrow \frac{\pi}{4}$ gilt $v(x) \nearrow \infty$.



(3) Das Problem $y'(x) = x^2 + y(x)^2$ mit Start in $y(0) = 1$ können wir leider nicht so einfach und explizit lösen.

Satz M1C garantiert zunächst Existenz und Eindeutigkeit: Es gibt genau eine maximale Lösung $y : [0, x_1[\rightarrow \mathbb{R}$. M122

Satz M4C erlaubt den Vergleich der (noch unbekannt) Lösung y mit Unterlösungen u und Oberlösungen v :

😊 Wir erhalten ohne numerische Mühe die Eingrenzung

$$\frac{1}{1-x} \leq y(x) \leq \tan\left(x + \frac{\pi}{4}\right).$$

Wir finden Polstellen in $0.785 \approx \pi/4 \leq x_1 \leq 1$: Die Lösung y lebt also mindestens bis 0.785, jedoch höchstens bis 1.

Auch die Lösung y explodiert: Für $x \nearrow x_1$ gilt $y(x) \nearrow \infty$.

😊 In vielen Fällen genügt diese grobe Information. Andernfalls unternehmen wir eine numerische Näherung.

Der Ansatz $w(x) = 1/(1+ax)$ liefert bessere Oberlösungen für $a \geq 17/16$. Die obige Skizze zeigt, wie erstaunlich genau diese Eingrenzung bereits ist.

Die hier benutzte **Rundungsregel** ist ebenso einfach wie genial: Wir können $y'(x) = f(x, y(x))$ mit $y(x_0) = y_0$ wie folgt eingrenzen.

1 Wir runden f und y_0 geschickt ab zu $f^\downarrow \leq f$ und $y_0^\downarrow \leq y_0$ und lösen das leichtere Problem $u(x) = f^\downarrow(x, u(x))$ mit $u(x_0) = y_0^\downarrow$.

2 Wir runden f und y_0 geschickt auf zu $f^\uparrow \geq f$ und $y_0^\uparrow \geq y_0$ und lösen das leichtere Problem $v(x) = f^\uparrow(x, v(x))$ mit $v(x_0) = y_0^\uparrow$.

Der folgende Satz M4C erfüllt unsere Hoffnung, denn es gilt $u \leq y \leq v$.

Satz M4D erklärt alles nötige für die strikten Ungleichungen $u < y < v$.

Hier sind Geschick und Kreativität gefordert: Die gewählten Rundungen $f^\downarrow \leq f \leq f^\uparrow$ sollen möglichst nahe bei f liegen, aber leichter lösbar sein.

Aufgabe: (4) Der Ansatz $w(x) = \frac{1}{1+ax}$ liefert bessere Oberlösungen.

Lösung: (4) Wir finden $w'(x) = aw(x)^2$. Wir wünschen $w(x) \geq y(x)$. Hierzu genügt $w'(x) \geq x^2 + w(x)^2$, eingesetzt also $(a-1)w(x)^2 \geq x^2$. Wir nutzen $w(x) \geq u(x) = 1/(1-x)$, wollen also $(a-1)/(1-x)^2 \geq x^2$. Es genügt $(a-1) \geq 1/16 \geq x^2(1-x)^2$, wir finden so $a = 17/16$.
Probe: Es gilt $w'(x) = aw(x)^2 \geq x^2 + w(x)^2$, dank M4C also $w \geq y$.

Wir betrachten ein Anfangswertproblem, wie üblich von der Form

$$y'(x) = f(x, y(x)), \quad y(x_0) = y_0.$$

Satz M4c: Eingrenzung durch Unter/Oberlösungen

Die Funktion $f: \mathbb{R}^2 \supseteq I \times K \rightarrow \mathbb{R}: (x, y) \mapsto f(x, y)$ sei stetig und in y stetig differenzierbar; $I = [x_0, x_1]$ und K seien kompakte Intervalle.

Seien $y, u, v: I \rightarrow K$ differenzierbar, sodass für alle $x \in I$ gilt:

(a) y ist eine **Lösung** des AWP: $y'(x) = f(x, y(x)), \quad y(x_0) = y_0$

(b) u ist eine **Untерlösung**: $u'(x) \leq f(x, u(x)), \quad u(x_0) \leq y_0$

(c) v ist eine **Oberlösung**: $v'(x) \geq f(x, v(x)), \quad v(x_0) \geq y_0$

Dann gilt:

$$u(x) \leq y(x) \leq v(x) \quad \text{für alle } x \in I$$

Allein aus (a,b) folgt bereits $u \leq y$, und mit $u(x_0) < y_0$ sogar $u < y$.

Allein aus (a,c) folgt bereits $y \leq v$, und mit $v(x_0) > y_0$ sogar $v > y$.

😊 Der Satz ist bequem und intuitiv plausibel. Der Beweis ist trickreich.

Eingrenzung durch Unter/Oberlösungen

Beweis: (1) Wir zeigen zunächst: Aus (b,c) und $u \geq v$ folgt $u = v$.

Die Ableitung $\partial f / \partial y$ ist stetig und $I \times K \subseteq \mathbb{R}^2$ kompakt, also gilt eine Schranke $\partial f / \partial y \leq M < \infty$. Für jedes $x \in I$ folgt dank $u \geq v$ in K und Mittelwertsatz $f(x, u) - f(x, v) = (\partial f / \partial y)(x, \zeta) \cdot (u - v) \leq M \cdot (u - v)$. Die Hilfsfunktion $\varphi(x) = [u(x) - v(x)] e^{-M(x-x_0)} \geq 0$ ist differenzierbar:

$$\begin{aligned} \varphi'(x) &= [u'(x) - v'(x)] e^{-M(x-x_0)} - M [u(x) - v(x)] e^{-M(x-x_0)} \\ &\leq ([f(x, u(x)) - f(x, v(x))] - M [u(x) - v(x)]) e^{-M(x-x_0)} \leq 0 \end{aligned}$$

Es gilt $u(x_0) = v(x_0)$, also $\varphi(x_0) = 0$, sowie $\varphi' \leq 0$, also $\varphi = 0$.

(2) Mit (1) folgern wir die Eingrenzung $u \leq y \leq v$. Zunächst $u \leq v$:

Angenommen, die Ungleichung $u \leq v$ gälte nicht auf ganz $I = [x_0, x_1]$. Dann gäbe es ein Intervall $[a, b] \subseteq I$ mit $u(a) = v(a)$ und $u > v$ auf $]a, b[$. Mit (1) folgt aus $u \geq v$ auf $[a, b]$ aber $u = v$ auf $[a, b]$, ein Widerspruch! Also gilt $u \leq v$ auf ganz $[x_0, x_1]$. Hieraus folgt schließlich der Satz M4c: Statt (u, v) vergleichen wir nun (u, y) und (y, v) und erhalten $u \leq y \leq v$.

Satz M4C beinhaltet insbesondere die Eindeutigkeit der Lösung y . M122
 Ohne stetige Ableitung $\partial f/\partial y$ gelten diese Aussagen nicht mehr! M325
 Setzen wir f nur als stetig voraus, so gilt immerhin noch folgendes:

Satz M4D: Eingrenzung durch Unter/Oberlösungen

Sei $f: \mathbb{R}^2 \supseteq G \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, $I = [x_0, x_1] \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall, $y, u, v: I \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbare Funktionen mit Graph in G , sodass für alle $x \in I$ gilt:

- (a) y ist eine **Lösung** des AWP: $y'(x) = f(x, y(x)), \quad y(x_0) = y_0$
 (b) u ist eine **strikte Unterlösung**: $u'(x) < f(x, u(x)), \quad u(x_0) \leq y_0$
 (c) v ist eine **strikte Oberlösung**: $v'(x) > f(x, v(x)), \quad v(x_0) \geq y_0$

Dann gilt:

$$u(x) < y(x) < v(x) \quad \text{für alle } x \in]x_0, x_1]$$

Allein aus (a,b) folgt bereits $u < y$. Allein aus (a,c) folgt bereits $y < v$.

In Satz M4C ist die Bedingung an f streng, aber die Ungleichungen schwach (in Voraussetzung und Schlussfolgerung). In Satz M4D ist die Bedingung an f schwach, aber alle Ungleichungen sind strikt. Das AWP kann hier mehrere Lösungen y haben, doch alle liegen zwischen u und v ! Für die qualitative Beschreibung von Lösungen sind diese Abschätzungen ungemein nützlich.

Lemma M4E: Du musst steigen oder sinken. . .

Sei $g: \mathbb{R} \supseteq [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $g(a) = g(b) = 0$ differenzierbar in a bzw. b .

$$\begin{array}{ccc} g'(a) > 0 & \xRightarrow{\neq} & g > 0 \text{ auf }]a, a + \varepsilon[\\ \downarrow & & \downarrow \\ g'(a) \geq 0 & \xleftarrow{\neq} & g \geq 0 \text{ auf } [a, a + \varepsilon[\end{array} \quad \begin{array}{ccc} g'(b) < 0 & \xRightarrow{\neq} & g > 0 \text{ auf }]b - \varepsilon, b[\\ \downarrow & & \downarrow \\ g'(b) \leq 0 & \xleftarrow{\neq} & g \geq 0 \text{ auf }]b - \varepsilon, b]. \end{array}$$

Übung: Rechnen Sie diese Implikationen nach: Nutzen Sie direkt den Differenzenquotienten! Die Umkehrungen gelten nicht: Gegenbeispiele!

Beweis des Satzes: Aus $u(x_0) < y(x_0)$ folgt $u < y$ auf $[x_0, x_0 + \varepsilon[$.

Bei $u(x_0) = y(x_0)$ nutzen wir das Lemma für $g = y - u: [x_0, x_1] \rightarrow \mathbb{R}$.

Es gilt $g(x_0) = 0$ und $g'(x_0) > 0$, also $g > 0$ auf $]x_0, x_0 + \varepsilon[$, d.h. $u < y$.

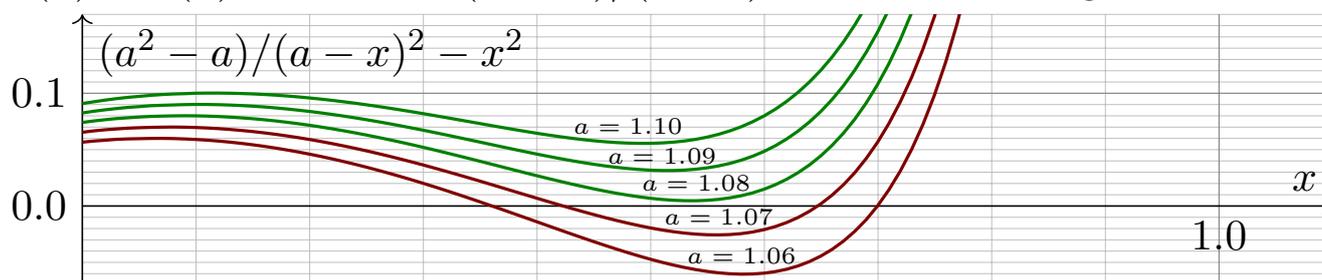
Wir zeigen $u < y$ auf ganz $]x_0, x_1]$. Angenommen, dies gälte nicht. Dann sei $\xi := \inf\{x \in [x_0 + \varepsilon, x_1] \mid u(x) \geq y(x)\}$. Damit gilt $u < y$ auf $]x_0, \xi[$ und $u(\xi) = y(\xi)$. Das Lemma zeigt $u'(\xi) \geq y'(\xi)$. Nach (a,b) gilt aber $u'(\xi) < f(\xi, u(\xi)) = f(\xi, y(\xi)) = y'(\xi)$, ein Widerspruch! Wir schließen, dass $u < y$ auf $]x_0, x_1]$ gelten muss. Ebenso folgt die Ungleichung $y < v$.

Wir untersuchen das AWP $y(0) = 1$ und $y'(x) = y(x)^2 - x^2$ für $x \geq 0$.

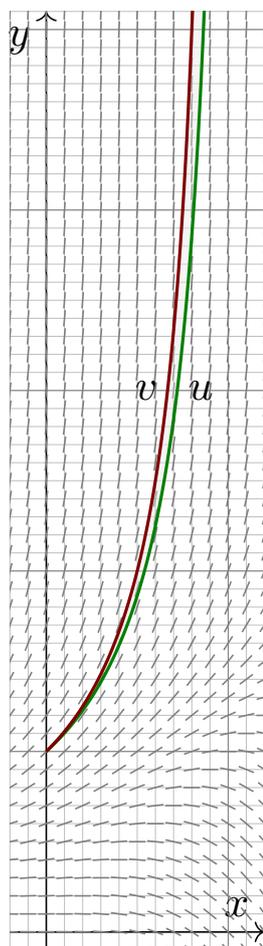
- Aufgabe:** (1) Gibt es eine eindeutige maximale Lösung $y: [0, x_1[\rightarrow \mathbb{R}$? Existiert sie zumindest für $0 \leq x < 1$? Explodiert sie in endlicher Zeit?
 (2) Vergleichen Sie mit dem AWP $v(0) = 1$ und $v'(x) = v(x)^2$ für $x \geq 0$.
 (3) Gilt $y(x) \geq u(x) := a/(a-x)$? Probieren Sie $a = 1.07$ und $a = 1.08$.

Lösung: (1) Ja, dank \exists &E-Satz M1c. (2) Es gilt $f^\uparrow(x, y) := y^2 \geq f(x, y)$. Die Oberlösung $v(x) = 1/(1-x)$ zeigt $y(x) \leq v(x)$ dank Satz M4c. Die Lösung y existiert demnach mindestens auf dem Intervall $[0, 1[$.

(3) Für $u(x) = a/(a-x)$ gilt $u(0) = 1$ und $u'(x) = a/(a-x)^2$. Wir wollen $u'(x) \leq u(x)^2 - x^2$, also $(a^2 - a)/(a-x)^2 - x^2 \geq 0$. Dies gilt für $a \geq 1.08$:



Somit ist $u(x) = 1.08/(1.08-x)$ eine Unterlösung. Dank Satz M4c gilt $y(x) \geq u(x)$. Die Lösung y explodiert in endlicher Zeit, bei $x_1 \in [1, 1.08]$.



Das AWP $y'(x) = y(x)^2 - x^2$, $y(0) = 1$ können wir nicht elementar lösen, d.h. explizit als geschlossene Formel. Satz M1c garantiert zunächst Existenz und Eindeutigkeit: Es gibt genau eine maximale Lösung $y: [0, x_1[\rightarrow \mathbb{R}$. M122
 Das ist schön und gut. Wie berechnen wir genaueres? Satz M4c erlaubt den Vergleich der (noch unbekannt) Lösung y mit Unterlösungen u und Oberlösungen v :

😊 Wir erhalten ohne numerische Mühe die Eingrenzung

$$\frac{1.08}{1.08-x} \leq y(x) \leq \frac{1}{1-x}.$$

Satz M4D garantiert die strikten Ungleichungen für $x > 0$. Wir finden Polstellen in $1 \leq x_1 \leq 1.08$: Unsere Lösung y lebt also mindestens bis 1, jedoch höchstens bis 1.08.

😊 In vielen Fällen genügt diese grobe Information. Andernfalls unternehmen wir eine numerische Näherung.

Aufgabe: Sei $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, aber nicht notwendig differenzierbar. Wir untersuchen das AWP $y(x_0) = y_0$ und $y'(x) = f(x, y(x))$ für $x \geq x_0$ und wollen das Wachstum bequem abschätzen: Es gelte $|y_0| \leq c$ und eine in $|y|$ lineare Schranke $|f(x, y)| \leq a(x)|y| + b(x)$ mit $a, b \geq 0$ stetig.

- (1) Lösen Sie zunächst $u'(x) = a(x)u(x) + b(x)$ mit $u(x_0) = c$, speziell
 (2) für $a, b \geq 0$ konstant. Sind die Lösungen u eindeutig? (3) Existieren sie für alle Zeit $x \geq x_0$? Oder enden sie vorzeitig in einer Polstelle?
 (4) Welche Schranken folgen für y ? (5) Sind die Lösungen y eindeutig?
 (6) Existieren sie für alle Zeit $x \geq x_0$? Oder enden sie evtl. vorzeitig?

Lösung: (1) Wir runden auf: Zur linearen DG $u'(x) = a(x)u(x) + b(x)$ mit $u(x_0) = c$ ist die Lösungen eindeutig und explizit bekannt (M2E):

$$u(x) = e^{A(x)} \left[\int_{t=x_0}^x e^{-A(t)} b(t) dt + c \right] \geq 0 \quad \text{mit} \quad A(x) = \int_{t=x_0}^x a(t) dt$$

(2) Speziell für a, b konstant gilt $A(x) = a(x - x_0)$ und somit

$$u(x) = e^{a(x-x_0)} \left[\int_{t=x_0}^x e^{-a(t-x_0)} b dt + c \right] = e^{a(x-x_0)} (c + b/a) - b/a.$$

Im Sonderfall $a = 0$ erhalten wir noch einfacher $u(x) = b(x - x_0) + c$.

(3) Die Lösung u existiert für alle Zeit $x \geq x_0$: Sie hat keine Polstellen!

(4) Wir zeigen $y(x) \leq u(x)$ für alle $x \geq x_0$. Für $x \geq x_0$ mit $y(x) \leq 0$ ist dies klar, denn $u(x) \geq 0$. Für $x \geq x_0$ mit $y(x) \geq 0$ nutzen wir Satz M4c:

Es gilt $y'(x) = f(x, y(x)) \leq a(x)y(x) + b(x)$. Es folgt $y(x) \leq u(x)$, denn y ist eine Unterlösung zu u . Genauer sei $x_0 < x_1 < x_2 < x_3 < \dots$ mit $y|_{[x_0, x_1]} \geq 0$ und $y|_{]x_1, x_2[} < 0$ und $y|_{[x_2, x_3]} \geq 0$ etc. Auf $[x_0, x_1]$ nutzen wir $y(x_0) \leq c = u(x_0)$. Auf $[x_2, x_3]$ nutzen wir $y(x_2) = 0 \leq u(x_2)$, usw.

Hieraus folgt $y(x) \leq u(x)$ für alle $x \geq x_0$. Wörtlich dieselbe Rechnung für $-y$ und $-f$ statt y und f zeigt $-y \leq u$. Somit gilt insgesamt $|y| \leq u$.

(5) Nein, Lösungen sind im Allgemeinen nicht eindeutig! M123 M325
 Wir verlangen hier nur, dass f stetig ist; um den Eindeutigkeitssatz M1c anwenden zu können, müsste f zudem in y stetig differenzierbar sein.

(6) Jede Lösung y lässt sich für alle Zeit fortsetzen zu $y : [x_0, \infty[\rightarrow \mathbb{R}$.

😊 Die Ungleichung $|y| \leq u$ liefert eine bequeme explizite Schranke und garantiert insbesondere, dass y keine Polstellen entwickelt.

- Aufgabe:** (1) Formulieren Sie die radiale Flugbewegung $r : \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}$ einer Punktmasse m im Schwerfeld eines Planeten mit Masse M .
 (2) Multiplizieren Sie mit $m\dot{r}(t)$, integrieren Sie zur Energiegleichung.
 (3) Was ist die Fluchtgeschwindigkeit v_F ? Im Spezialfall der Erde?
 (4) Wie verläuft in diesem Grenzfall die Flugbahn $r(t)$?

Lösung: (1) Die Bewegungsgleichung ist nach Newton

$$\ddot{r}(t) = -\gamma M / r(t)^2, \quad r(0) = R > 0, \quad \dot{r}(0) = v_0 > 0.$$

Wie üblich ist hier $\gamma = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$ die Gravitationskonstante.

Newtons Bewegungsgesetz (in seiner allgemeinen Form) ist Grundlage der Himmelsmechanik. Im Allgemeinen benötigt man für solche DG numerische Methoden. In unserem Spezialfall (4) jedoch können wir sie exakt lösen! Das ist bemerkenswert, und diese Technik sollten Sie kennen.

😊 Das Zweikörperproblem lässt sich exakt lösen: Kepler um 1600 empirisch, Newton 1687 mathematisch, Bahnen sind Ellipsen, Parabeln, Hyperbeln. Es ist oft eine nützliche Näherung.

⚠️ Für drei und mehr Körper lässt sich die Lösung nicht mehr elementar formulieren, die Differentialgleichung kann im Allgemeinen nur noch numerisch gelöst werden. [O125]

- (2) Wir multiplizieren die DG mit $m\dot{r}(t)$ und erhalten

$$m\dot{r}(t)\ddot{r}(t) + \frac{\gamma m M \dot{r}(t)}{r(t)^2} = 0.$$

Durch Integration von 0 bis t erhalten wir die äquivalente Gleichung

$$\frac{1}{2}m\dot{r}(t)^2 - \frac{\gamma m M}{r(t)} = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{\gamma m M}{R} =: E.$$

😊 Die Summe aus kinetischer und potentieller Energie ist konstant! Das Bewegungsgesetz impliziert Energieerhaltung (und umgekehrt).

- (3) Wir suchen die Geschwindigkeit v_0 zur Flucht $r(t) \rightarrow \infty$ für $t \rightarrow \infty$. Notwendig hierzu ist nach obiger Energieformel $E \geq 0$, also

$$v_0 \geq v_F := \sqrt{2\gamma M / R}$$

Beispiel Erde: $M = 5.97 \cdot 10^{24} \text{kg}$, $R = 6.36 \cdot 10^6 \text{m}$, $v_F = 11.2 \text{km/s}$.

😊 Dies ist die berühmte Fluchtgeschwindigkeit von der Erdoberfläche. Zum Vergleich: $11\,200 \text{m/s}$ ist etwa 33-fache Schallgeschwindigkeit.

(4) Im Grenzfall $E = 0$ vereinfacht sich unsere Differentialgleichung zu

$$\dot{r}(t) = \sqrt{2\gamma M} r(t)^{-1/2}, \quad r(0) = R.$$

Diese DG lösen wir durch Trennung der Variablen und Integration:

$$\Rightarrow \int_{\tau=0}^t \dot{r}(\tau) r(\tau)^{1/2} d\tau = \int_{\tau=0}^t \sqrt{2\gamma M} d\tau$$

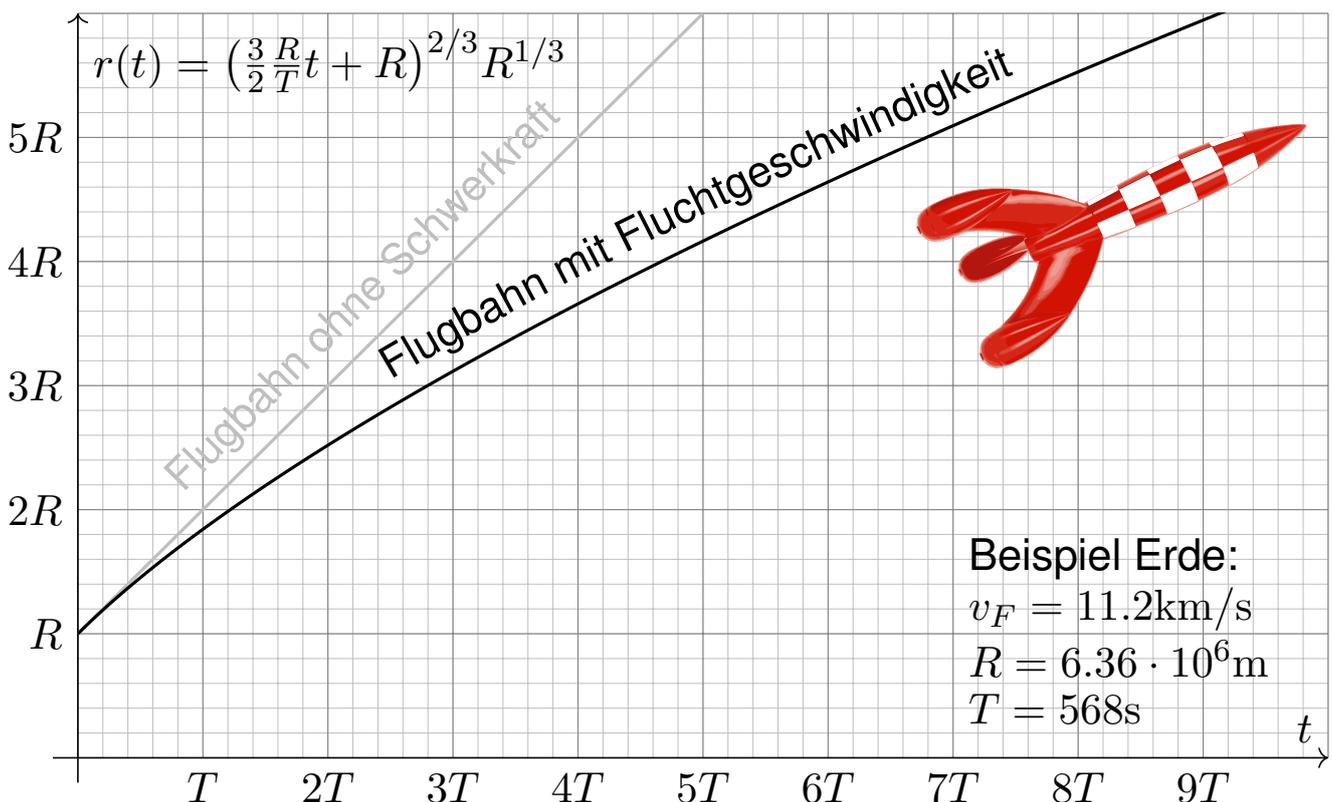
$$\Rightarrow \left[\frac{2}{3} r(\tau)^{3/2} \right]_{\tau=0}^t = \sqrt{2\gamma M} \cdot t$$

$$\Rightarrow r(t)^{3/2} - R^{3/2} = \frac{3}{2} \sqrt{2\gamma M} \cdot t$$

$$\Rightarrow r(t) = \left(\frac{3v_F}{2} \cdot t + R \right)^{2/3} R^{1/3}$$

😊 Diese Funktion löst die ursprüngliche Bewegungsgleichung mit den AW $r(0) = R$ und $\dot{r}(0) = v_F$ sowie $r(t) \rightarrow \infty$ und $\dot{r}(t) \rightarrow 0$ für $t \rightarrow \infty$. Die Geschwindigkeit v_F genügt also tatsächlich, um dem Schwerefeld der Masse M zu entfliehen! Somit ist v_F die Fluchtgeschwindigkeit.

Skizze der gefundenen Lösung (in natürlichen Einheiten):



Aufgabe: (1) Eine Rakete mit Masse $m(t)$ und Geschwindigkeit $v(t)$ wird angetrieben durch konstanten Massenausstoß $\mu = -\dot{m} = \dots \text{kg/s}$ mit Geschwindigkeit $v_b = 3500 \text{m/s}$. Die Rakete bestehe anfangs zu 99% aus Brennstoff. Was ist die Endgeschwindigkeit (ohne weitere Kräfte)?

Lösung: (1) Die Impulserhaltung ergibt folgende Bilanz:

$$0 = dp = \underbrace{d(mv)}_{\text{Rakete}} - \underbrace{(dm)(v - v_b)}_{\text{ausgestoßene Masse}} = \underbrace{m \cdot dv + dm \cdot v_b}_{\text{Bilanz im Schwerpunktsystem}}$$

Division durch dt , Trennung der Variablen, Integration bis Brennschluss:

$$\Rightarrow \dot{v}(t) = -v_b \frac{\dot{m}(t)}{m(t)}$$

$$\Rightarrow \int_{t=t_0}^{t_1} \dot{v}(t) dt = -v_b \int_{t=t_0}^{t_1} \frac{\dot{m}(t)}{m(t)} dt$$

$$\Rightarrow v(t_1) - v(t_0) = -v_b \left[\ln m(t) \right]_{t=t_0}^{t_1} = v_b \ln \frac{m(t_0)}{m(t_1)}$$

$$\text{Zahlenbeispiel} \quad = 3.5 \text{km/s} \cdot \ln(100) \approx 16.1 \text{km/s}$$

Aufgabe: (2) Bei welcher Brenndauer kann man so der Erde entfliehen? (Senkrechter Start, keine Luftreibung, keine Zentrifugalkraft etc.)

Lösung: Von (1) subtrahieren wir die Erdbeschleunigung $g \lesssim 9.81 \text{m/s}^2$:

$$\Rightarrow \dot{v}(t) = -v_b \frac{\dot{m}(t)}{m(t)} - g$$

$$\Rightarrow v(t_1) - v(t_0) = v_b \ln \frac{m(t_0)}{m(t_1)} - g(t_1 - t_0)$$

Bei vertikalem Start im Schwerfeld der Erde addiert sich der freie Fall. Zur Vereinfachung nehmen wir geringe Flughöhe an, somit konstantes g . (In Wirklichkeit nimmt die Erdbeschleunigung $g(r/R)^{-2}$ deutlich ab; leider ist die genauere Gleichung auch mühsamer zu integrieren...) Ich begnüge mich hier mit einer groben **Überschlagsrechnung**.

Hinreichend kurze Brenndauer $T = t_1 - t_0$ zur Flucht:

$$gT < 16.1 \text{km/s} - 11.2 \text{km/s} \approx 4900 \text{m/s}$$

$$\Rightarrow T < 500 \text{s}$$

Konstantin Ziolkowski (1857–1935) arbeitete als Mathematiklehrer, seine wissenschaftlichen Studien veröffentlichte er als Amateur. Aufgrund seiner Berechnungen erkannte er, dass damals mögliche Feststoffraketen zum Erreichen des Weltraums zu schwach wären, und schlug zum Antrieb Flüssigtreibstoff vor (Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenwasserstoffe). Er veröffentlichte 1903 die Raketengrundgleichung und leitete daraus das Prinzip der Mehrstufenrakete ab.

Zahlenbeispiel für eine zweistufige Rakete: erste Stufe voll 50t, leer 5t, zweite Stufe voll 10t, leer 1t, Nutzlast 1t, Startgeschwindigkeit $v(t_0) = 0$, Endgeschwindigkeit $v_{\text{End}} = v(t_1)$:

$$\frac{v_{\text{End}}}{v_b} = \ln \frac{50 + 10 + 1}{5 + 10 + 1} + \ln \frac{10 + 1}{1 + 1} \approx 1.34 + 1.70 = 3.03$$

Zum Vergleich eine einstufige Rakete mit gleicher Treibstoff- und Strukturmasse:

$$\frac{v_{\text{End}}}{v_b} = \ln \frac{50 + 10 + 1}{5 + 1 + 1} \approx 2.16$$

Bei sonst gleichen Daten erreicht die einstufige Rakete also eine geringere Endgeschwindigkeit. Das ist anschaulich plausibel, da mehr (überflüssige) Strukturmasse beschleunigt werden muss. Die Raketengrundgleichung und die abgeleitete Rechnung präzisieren dieses Phänomen.

Die Raketengrundgleichung folgt aus Impulserhaltung und einer einfachen Differentialgleichung. Sie ist grundlegend für Trägerraketen, da hier die Treibstoffmasse groß ist, und die Gesamtmasse während des Fluges stark abnimmt. Hingegen ist für Orbiter wie den Mars- oder Venus-Express (Seite W221) der Verlust der Treibstoffmasse vernachlässigbar im Vergleich zur Gesamtmasse.

An der Geschichte der Raumfahrt sehen wir exemplarisch eine einhundertjährige Entwicklung von futuristischer Vision über die mathematische Theorie bis hin zur technischen Realisierung. Ich betone nochmals: Ohne Vision keine Theorie, ohne Theorie keine erfolgreiche Anwendung.

Jules Verne (1828–1905) war ein französischer Schriftsteller und ein Begründer der Science-Fiction-Literatur. Die Abenteuer seiner Helden thematisieren den rasanten Fortschritt und neue technische Möglichkeiten seiner Epoche und nehmen viele zukünftige Entwicklungen vorweg: *Cinq semaines en ballon* (Fünf Wochen im Ballon, 1863), *De la Terre à la Lune* (Von der Erde zum Mond, 1865), *Autour de la Lune* (Reise um den Mond, 1869), *Vingt mille lieues sous les mers* (Zwanzigtausend Meilen unter dem Meer, 1869). Sein größter Erfolg war der Roman *Le Tour du monde en 80 jours* (In 80 Tagen um die Welt, 1872), der bis heute populär ist.

Konstantin Ziolkowski (1857–1935) war ein russischer Mathematiker und Physiker, Amateur und Wegbereiter der Raumfahrt. Er vollzog den Schritt von *Fiction* zu *Science*: Angeregt durch Jules Verne's Erzählungen, schrieb Ziolkowski selbst Geschichten über interplanetare Raumfahrt. Dazu untersuchte er zunehmend die physikalisch-technischen Probleme von Raumflügen, lang bevor sie realisiert werden konnten. Er befasste sich mit Fragen des Betriebs von Raumstationen, der industriellen Nutzung des Weltraums, und schlug den Weltraumlift vor, um Objekte möglichst günstig direkt in den geostationären Orbit zu befördern. Er hat jedoch nie eine Rakete gebaut und schien bei vielen seiner Theorien nicht davon auszugehen, dass sie jemals umgesetzt würden. Sein technischer Weitblick wurde erst spät gegen Ende seines Lebens erkannt und inspirierte nachfolgende Wissenschaftler wie Hermann Oberth (1894–1989) und Wernher von Braun (1912–1977). Den Beginn der Raumfahrt (Sputnik 1957, Juri Gagarin 1961) erlebte er nicht.