

Gewöhnliche Differentialgleichungen
Vorlesung
Universität Hamburg
Roland Gunesch

SS 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Was sind Differentialgleichungen	7
1.2	Erste numerische Schritte	17
1.3	Bezeichnungen	20
1.4	Hilfsmittel aus der Analysis	21
1.4.1	Der Kontraktionssatz (Banachs Fixpunktsatz)	22
1.4.2	Mannigfaltigkeiten	25
1.5	Aufgaben	32
2	Allgemeine Existenzsätze	35
2.1	Nichtautonome Differentialgleichungen	35
2.1.1	Die Existenz von Integralkurven	35
2.1.2	Fortsetzbarkeit	41
2.2	Stetige Abhängigkeit	43
2.3	Differentialgleichungen höherer Ordnung	58
2.4	Ober- und Unterlösungen	60
2.5	Aufgaben	61
3	Lineare Differentialgleichungen	63
3.1	Jordan-Normalform	63
3.2	Exponentialabbildung	65
3.3	Nichtautonome lineare Gleichungen	69
3.4	Ebene lineare Systeme	72
3.5	Eigenwerte und Langzeitverhalten	76
3.6	Aufgaben	77

4	Berechnung von Lösungen	79
4.1	Polygonzugmethode	79
4.2	Impliziter Euler	81
4.3	Runge-Kutta-Verfahren	83
4.4	Aufgaben	86
5	Anfänge einer geometrischen Theorie	89
5.1	Autonome Systeme	89
5.2	Poincaré-Bendixson-Satz	95
5.3	Wazewski-Prinzip	101
5.4	Gradientensysteme	105
5.5	Hamilton'sche Systeme	106
5.6	Aufgaben	111
6	Stabilität	113
6.1	Stabilität einer Ruhelage	113
6.2	Stabilität einer periodischen Lösung	123
6.3	Lyapunov-Funktionen	131
6.4	Instabile Mannigfaltigkeit	133
6.5	Verzweigungen	135
6.5.1	Stationäre Verzweigungen	135
6.5.2	Hopf-Verzweigung	139
6.5.3	Stabilitätsverlust für periodischen Lösungen	142
6.6	Aufgaben	143
7	Topologische Äquivalenz	145
7.1	Strukturelle Stabilität	145
7.2	Der Satz von Hartman-Grobman	151
7.3	Aufgaben	155
8	Euler-Charakteristik	157
8.1	Drehung	157
8.2	Anwendung	159
8.3	Aufgaben	159

Dieses Skript basiert auf einem Skript von Reiner Lauterbach. Ich danke ihm herzlich für die freundliche Genehmigung zur Verwendung und Modifikation.

Kapitel 1

Einführung

1.1 Was sind Differentialgleichungen?

In der Vorlesung „Gewöhnliche Differentialgleichungen“ beschäftigt man sich, wie der Name schon besagt, mit Differentialgleichungen und Eigenschaften der Lösungen, sowie mit Methoden, diese zu bestimmen. Was aber ist eine Differentialgleichung? Wir wollen hier keine formale Definition geben. Einfach gesagt ist es eine Gleichung, mit der man eine Funktion u sucht. In dieser Gleichung tritt die Funktion u selbst, Ableitungen von u und vielleicht noch die Variable(n), von denen u abhängt, auf. Bevor wir uns weiter in Allgemeinheiten verlieren, ein Beispiel:

$$(1.1.1) \quad u' = u,$$

wobei die gesuchte Funktion u von einer unabhängigen Veränderlichen x abhängen soll. Eine Lösung kann man leicht angeben:

$$(1.1.2) \quad u(x) = e^x.$$

Offensichtlich löst die angegebene Funktion Gleichung (1.1.1), jedoch ist es nicht die einzige Lösung. Weitere Lösungen findet man leicht. Oft ist man nicht an der gesamten Lösungsvielfalt interessiert, sondern man stellt weitere Forderungen, um eine eindeutige Lösbarkeit zu gewährleisten. Bevor ich exemplarisch typische zusätzliche Anforderungen angebe und motiviere, will ich noch eine weitere Abgrenzung vornehmen. Sucht man Funktionen $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ und gibt eine Relation zwischen u und den Ableitungen von u an, so spricht man von einer **gewöhnlichen Differentialgleichung**. Betrachtet man hingegen Funktionen, die auf einem höherdimensionalen Raum, z.B. dem \mathbb{R}^n , definiert sind, und hat man Beziehungen zwischen u und den **partiellen** Ableitungen von u , so handelt es sich um eine **partielle Differentialgleichung**. Das Interesse an Differentialgleichungen ist schon alt. Erstens gibt es einen engen Zusammenhang zwischen Differentialgleichungen und der sogenannten Variationsrechnung. Die Variationsrechnung hat die Entwicklung der Analysis zu Zeiten von Euler und der Bernoullis entscheidend geprägt. Eine typische Aufgabenstellung ist Bestimmung von kürzesten

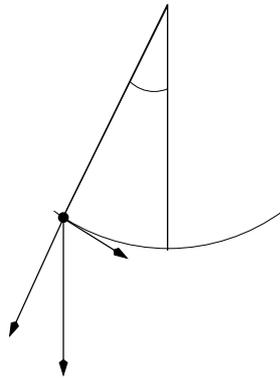


Abbildung 1.1: Am Pendel wirkende Kraft bei einer Auslenkung φ

Wegen unter bestimmten Nebenbedingungen. Zweitens eignen sich Differentialgleichungen hervorragend zum Modellieren von Problemen der realen Welt. Diese Problemstellungen haben auch die Typen der oft untersuchten Gleichungen und der zusätzlichen Bedingungen, die man an die Lösung stellt um Eindeutigkeit zu erzielen, geprägt. Wir betrachten eine Reihe von Beispielen. Gleichzeitig lernen wir eine Anzahl von Techniken kennen, mit der man explizite Lösungen erhalten kann. Man muss aber sagen, dass die meisten Differentialgleichungen analytisch nicht in geschlossener Form gelöst werden können. Analytische Methoden liefern aber oft, und das aufzuzeigen ist ein Ziel dieser Vorlesung, Aufschluß über qualitatives Verhalten. Darunter wollen wir verstehen, Frage nach dem Langzeitverhalten, Stabilität von Lösungen usw.. Während sich das quantitative Verhalten von Lösungen heutzutage recht eindrucksvoll mit dem Computer untersuchen läßt, sind die qualitativen Aussagen fast ausschließlich analytischen Untersuchungen zu verdanken. Moderne Fragestellungen von Anwendern verlangen oft beides. Die Symbiose von analytischem Werkzeug und Rechnern kann zu neuer Einsicht führen. Deshalb wollen wir uns im weiteren Verlauf auch mit numerischen Methoden beschäftigen. Zunächst zu einigen Modellproblemen. Bei manchen dieser Probleme werde ich zur Begründung, warum gerade die angegebene Gleichung untersucht wird, einige physikalische Überlegungen anstellen. Diese sind für das Verstehen der Mathematik nicht notwendig.

- **Das mathematische Pendel**

Hier hat man es mit folgender Aufgabenstellung zu tun: Ein Pendel der Länge ℓ und Masse M sei an einem festen Punkt P aufgehängt und schwinde in einer Ebene um die untere Ruhelage. Wir wollen den zeitlichen Verlauf der Bewegung untersuchen. Zunächst eine Konvention. Da die unabhängige Variable die Zeit ist, werden wir sie, wie allgemein üblich, mit $t \in \mathbb{R}$ bezeichnen. Bei der zu beschreibenden Bewegung reicht es offensichtlich, die Winkelauslenkung φ zu jedem Zeitpunkt t anzugeben. Wir werden die Bewegung also durch eine (gesuchte) Funktion $\varphi(t)$ beschreiben. Wie erhält man eine Gleichung für φ ? Dazu betrachten wir Abbildung 1.1: Mit $-g$ bezeichnen wir die Erdbeschleunigung, dann wirkt auf M die Kraft $-Mg$, wobei der radiale Anteil dafür sorgt, dass die

Befestigung gespannt bleibt, während der tangentiale Anteil für die Winkelbeschleunigung $\ell\varphi''(t)$ sorgt. (Hierbei bezeichnet $\varphi'(t)$ die Ableitung von φ nach t . Ein echter Physiker würde natürlich stattdessen $\dot{\varphi}$ schreiben.) Als tangentialen Kraftanteil erhält man $-Mg \sin \varphi(t)$. Damit ergibt sich als Gleichung (aus dem Newtonschen Kraftgesetz¹)
(KRAFT=MASSE*BESCHLEUNIGUNG):

$$M\ell\varphi''(t) = -Mg \sin \varphi(t)$$

oder

$$(1.1.3) \quad \varphi''(t) = -\frac{g}{\ell} \sin \varphi(t).$$

Zur einfacheren Behandlung dieser Gleichung hat man schon früh ausgenutzt, dass zumindest für kleine Auslenkungen φ und $\sin \varphi$ annähernd gleich sind. Eine Näherungsgleichung (der Zusammenhang mit (1.1.3) bleibt dabei zumindest jetzt offen) ist daher

$$(1.1.4) \quad \varphi''(t) = -\frac{g}{\ell} \varphi(t).$$

Setzt man

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$

ergibt sich als Lösung dieser Gleichung

$$(1.1.5) \quad \varphi(t) = c_1 \sin(\omega t) + c_2 \cos(\omega t),$$

wobei $c_{1,2}$ beliebige reelle Konstanten sind. Man erkennt, dass man $c_{1,2}$ eindeutig bestimmen kann, wenn man eine Anfangsauslenkung und eine Anfangswinkelgeschwindigkeit vorgibt. Dies entspricht unseren Beobachtungen in der realen Welt. Es ist ein erstes Beispiel eines **Anfangswertproblems**.

- **Der radioaktive Zerfall**

Beim radioaktiven Zerfall betrachtet man folgenden Vorgang. Man hat zum Zeitpunkt 0 eine gewisse Menge u_0 einer radioaktiven Substanz. Mit $u(t)$ bezeichnen wir den zum Zeitpunkt t verbleibenden Rest der Substanz. Durch Beobachtungen erhält man, dass die Anzahl der Zerfälle proportional zur Menge der Substanz ist. Sei α diese Rate. Dann lautet die zugehörige Gleichung
(VERÄNDERUNG=ZERFALLSRATE*MENGE)

$$(1.1.6) \quad u'(t) = -\alpha u(t).$$

¹Isaac Newton (4.1.1643-31.3.1727) ist der berühmteste britische Mathematiker, Physiker und Astronom (lebende Personen nicht mitgezählt). Es ist einer der wenigen Wissenschaftler, dem die Ehre zu Teil wurde, in der Westminster Abbey begraben zu werden. Er schuf die Grundlagen unseres Verständnisses der Gravitation und der klassischen Mechanik. Er entdeckte die axiomatischen Grundlagen der rationalen Mechanik. Innerhalb der Mathematik war er einer der Wegbereiter der Analysis und damit der Theorie der Differentialgleichungen.

Jahr	Bevölkerung($\times 10^9$)
0	0.30
1000	0.31
1250	0.40
1500	0.50
1750	0.79
1800	0.98
1850	1.26
1900	1.65
1910	1.75
1920	1.86
1930	2.07
1940	2.30
1950	2.52
1960	3.02
1970	3.70
1980	4.44
1990	5.27
1998	5.90

Tabelle 1.1: Das Bevölkerungswachstum seit Christi Geburt, Quelle: UN

Wie bei Gleichung (1.1.1) kann man eine Lösung sofort hinschreiben:

$$(1.1.7) \quad u(t) = ce^{-\alpha t}.$$

Nachdem zum Zeitpunkt $t = 0$ gelten muss, dass $u(0) = u_0$ erhält man $c = u_0$. Aus dieser Beziehung leitet man sofort ab, wie lange es dauert, bis sich die Menge der radioaktiven Substanz halbiert hat. Ist nämlich $u(T) = \frac{1}{2}u_0$, so rechnet man aus $T = \ln(2)/\alpha$. Dieser Wert ist unabhängig von u_0 und daher gilt immer

$$(1.1.8) \quad u(t + T) = u(t)/2.$$

T wird als **Halbwertszeit** bezeichnet. Sie charakterisiert, wie wir eben gesehen haben, den Zerfallsprozeß. Wiederum haben wir es hier mit einem **Anfangswertproblem** zu tun. Allgemein führen Wachstums- oder Zerfallsprozesse, wobei die Veränderung proportional zur gegenwärtigen Größe ist, auf Differentialgleichungen von der Gestalt (1.1.6).

- **Bevölkerungswachstum**

Das Wachstum einer Population ist eine Frage von eminenter Bedeutung, sowohl in der Medizin, in der Zoologie, aber es ist auch eine existentielle Frage für die Menschheit. Hier zunächst einige Daten (Quelle: UN) s. Tabelle 1.1 Die nächste

Jahr	Bevölkerung($\times 10^9$)
2000	6.06
2010	6.79
2020	7.50
2030	8.11
2040	8.58
2050	8.91

Tabelle 1.2: Das prognostizierte Bevölkerungswachstum in den nächsten Jahrzehnten, Quelle: UN 1999

Jahr	Bevölkerung($\times 10^3$)
2000	6056715
2015	7207361
2025	7936741
2050	9322251

Tabelle 1.3: Das prognostizierte Bevölkerungswachstum nach Revision aus dem Jahr 2000, Quelle: UN 2002

Tabelle gibt einen Eindruck der weiteren Entwicklung in den nächsten Jahrzehnten s. Tabelle 1.2 Eine aktualisierte Tabelle aus dem Jahr 2000 prognostiziert (in der mittleren Variante) die in der Tabelle 1.3 angegebenen Zahlen.

Ein einfaches Modell zur Beschreibung einer Population p ohne natürliche Feinde ist, dass sowohl die Geburtenzahl, wie auch die Sterbezahl proportional zum Stand der Bevölkerung sind. Dann gibt es eine Geburtenrate B (birth rate), eine Sterberate D (death rate) und p genügt der Differentialgleichung

$$(1.1.9) \quad p' = Bp - Dp.$$

Aus (1.1.9) wird natürlich mit $\beta = B - D$ die Gleichung (1.1.6) mit $\alpha = -\beta$. Ist β positiv, hat man ein Bevölkerungswachstum, ähnlich der Halbwertszeit gibt es nun eine Verdoppelungszeit $T = \ln(2)/\beta$. Beobachtet man in der Realität ein Wachstum, das noch stärker ist (Verkürzung der Verdoppelungszeiten), dann ist (1.1.9) kein geeignetes Modell. Ein schwerwiegender Nachteil dieses Modells ist die Vorhersage grenzenlosen Wachstums. Dies ist wegen der Beschränktheit des Lebensraums nicht realistisch, und deshalb gab es schon lange Versuche, die Gleichung (1.1.9) zu modifizieren. Ein solches Modell ist die Einführung eines Streßfaktors S , der proportional zur Anzahl der Begegnungen von Individuen der Population ist. Diese ist proportional zu p^2 . Damit erhält man

$$(1.1.10) \quad p' = \beta p - Sp^2.$$

Mit $p(t) = \beta/S$ hat man eine konstante Lösung. Es ergibt sich sogar, dass jede positive Lösung sich an diese konstante Lösung annähert. Man erhält dies, indem man zu jedem Anfangswert eine Lösung durch diesen Anfangswert angibt, die diese Eigenschaft hat. Aus der Eindeutigkeit, die wir noch zeigen werden, folgt dann die Behauptung. Man bekommt die Lösung für einen beliebigen Anfangswert mit der Methode der **Trennung der Veränderlichen**. Wir nehmen uns vor, eine Lösung der Gestalt $p(t)$ mit $p(t_0) = p_0 \neq \beta/S$, zu finden und schreiben

$$\frac{dp}{dt} = \beta p - Sp^2.$$

Ist $\beta p - Sp^2 \neq 0$ erhält man

$$\frac{dp}{dt} \frac{1}{\beta p - Sp^2} = 1.$$

Integration dieser Gleichung von t_0 bis t liefert

$$\int_{t_0}^t p'(s) \frac{ds}{\beta p(s) - Sp(s)^2} = \int_{t_0}^t ds = t - t_0.$$

Ist $\beta p - Sp^2 \neq 0$, so ist auch $p' \neq 0$ und die linke Seite ergibt mit der Substitutionsregel

$$\int_{p_0}^p \frac{dz}{\beta z - Sz^2}.$$

Dies wird mittels einer Partialbruchzerlegung integriert. Es ergibt sich (wir führen diese Rechnung einmal sehr ausführlich durch) mit $K = \beta/S$

$$\frac{1}{\beta} \int_{p_0}^p \frac{dz}{z} \frac{K}{K-z} = \frac{1}{\beta} \int_{p_0}^p \left(\frac{1}{z} + \frac{1}{K-z} \right) dz = \frac{1}{\beta} \left(\ln \left(\frac{|p|}{|p-K|} \right) - \ln \left(\frac{|p_0|}{|p_0-K|} \right) \right).$$

Da die Größe der Population jeweils nicht negativ ist, kann man $p > 0$, $p_0 > 0$ annehmen. Daher hat man

$$\ln \left(\frac{p|p_0 - K|}{|p - K|p_0} \right) = \beta(t - t_0).$$

Einsetzen und Auflösen nach p bringt uns die endgültige Gestalt der Lösung

$$\frac{p(p_0 - K)}{(p - K)p_0} = e^{\beta(t-t_0)}.$$

Hier beachtet man noch, dass die Annahme, dass $p(s) \neq K$ für alle $s \in [t_0, t]$ dazu führt, dass $p - K$ und $p_0 - K$ gleiches Vorzeichen haben. Daraus erhält man

$$p = \frac{e^{\beta(t-t_0)} p_0}{p_0 - K} (p - K).$$

Bezeichnet man den hier aufgetretenen Bruch mit B so ergibt sich

$$p(1 - B) = -BK$$

und damit

$$p = \frac{BK}{(B - 1)}.$$

Einsetzen ergibt

$$p(t) = K \frac{e^{\beta(t-t_0)} p_0}{e^{\beta(t-t_0)} p_0 - p_0 + K}.$$

Multiplikation mit $e^{-\beta(t-t_0)}$ führt auf

$$(1.1.11) \quad p(t) = \frac{Kp_0}{p_0 - e^{-\beta(t-t_0)}(p_0 - K)}.$$

Wie erwartet, liefert das Einsetzen von $t = t_0$ den Wert p_0 . Um das Verhalten von p für $t \rightarrow \infty$ zu studieren, muss man sich nur das Verhalten des Nenners ansehen. Er konvergiert gegen p_0 und insgesamt ergibt sich der Wert K .

Wir wollen noch die Frage stellen: Woher kommen die Lösungen für $t < t_0$? Sozusagen fragen wir nach der Vergangenheit. Ist $p_0 \in (0, K)$ so existiert die Lösung für alle Zeiten $t \in \mathbb{R}$ und konvergiert für $t \rightarrow -\infty$ gegen 0. Ist jedoch $p_0 > K$, so würde formal die Grenzwertbetrachtung $t \rightarrow -\infty$ den gleichen Wert ergeben, dies jedoch erscheint absurd. Man überlegt sich, dass der Nenner für ein $t < t_0$ eine Nullstelle $t_1(p_0)$ hat und demzufolge die Lösung nur auf dem Intervall (t_1, ∞) existiert.

Die hier behandelte Gleichung wird oft als **logistische Gleichung** bezeichnet. Sie geht auf den belgischen Mathematiker VERHULST² zurück.

- **Die schwingende Saite**

Hier betrachtet man die Aufgabe, die Auslenkung u einer schwingenden Saite zum Zeitpunkt t an der Stelle x zu beschreiben. Ohne Begründung möchte ich im Moment die zugrundeliegende Differentialgleichung angeben. Sie lautet

$$(1.1.12) \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \lambda^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

Eine Herleitung dieser Gleichung findet man bei Heuser [5, S.291/292]. Üblicherweise befestigt man eine Saite an den Endpunkten und hindert sie damit an der Auslenkung. Wir nehmen an, dass diese Endpunkte $x = 0$ und $x = \pi$ sind. Damit erhält man die Randbedingungen $u(t, 0) = u(t, \pi) = 0$.

Hier handelt es sich um eine **partielle Differentialgleichung**. In diesem und im

²Pierre-Francois Verhulst (28.10.1804-15.2.1849) war Professor an der Freien Universität in Brüssel und später an der königlichen Militärschule. Seine Arbeiten zum Bevölkerungswachstum machten ihn zum Begründer der Bevölkerungsstatistik.

folgenden Beispiel sehen wir, dass gewöhnliche Differentialgleichungen eine erhebliche Rolle bei der Diskussion von Eigenschaften von Lösungen partieller Differentialgleichungen spielen.

Wir setzen der Einfachheit halber $\lambda = 1$. Mit dem Ansatz

$$(1.1.13) \quad u(x, t) = v(x)w(t)$$

erhält man die Beziehung

$$(1.1.14) \quad v(x)w''(t) = v''(x)w(t).$$

Steckt man noch die Annahme hinein, dass im Punkt (x, t) beide Funktionen v, w nicht verschwinden, so ergibt sich

$$(1.1.15) \quad \frac{w''(t)}{w(t)} = \frac{v''(x)}{v(x)}.$$

Da die beiden Seiten von verschiedenen Variablen abhängen, müssen diese konstant und gleich sein. Setzen wir diese Konstante $-K$, $K > 0$ so ergibt sich

$$(1.1.16) \quad \begin{aligned} w'' &= -Kw \\ v'' &= -Kv. \end{aligned}$$

Das Vorzeichen von K ist physikalisch motiviert. Sonst erhält man keine zeitlich periodische Lösung. Für eine vollständige Lösung muss man zumindest aus mathematischer Sicht auch den anderen Fall diskutieren. Eine Lösung der zweiten Gleichung lautet, wie in (1.1.5)

$$v(x) = c_1 \cos(\sqrt{K}x) + c_2 \sin(\sqrt{K}x).$$

Die Randbedingung $v(0) = 0$ eliminiert den Kosinusterm, die Bedingung $v(\pi) = 0$ ergibt für K die möglichen Werte $K = n^2$, wobei n eine beliebige natürliche Zahl ist. Damit kann man eine Schar von Lösungen der Gleichung (1.1.12) angeben. Sie lautet

$$(1.1.17) \quad u(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} (d_n^1 \cos(nt) + d_n^2 \sin(nt)) \sin(nx).$$

Geht man von einer Ausgangsauslenkung mit Ausgangsgeschwindigkeit 0 aus, so verschwindet der Sinusterm und man behält die Lösung

$$(1.1.18) \quad u(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} d_n \cos(nt) \sin(nx).$$

Ausführliche historische Bemerkungen findet man bei Heuser, [5, S. 441-449]. Diese seien allen Hörern anempfohlen. Man erkennt, dass über das Problem der

schwingenden Saite viele der großen Mathematiker nachgedacht haben, wir erwähnen EULER³, LAGRANGE⁴, BERNOULLI⁵, D'ALEMBERT⁶ und RIEMANN⁷. Diese Liste ist unvollständig.

- **Die Wärmeleitungsgleichung**

Wir betrachten die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung, die die Temperaturentwicklung in einem Stab modelliert. Wir nehmen an, wir hätten einen Stab der Länge ℓ . Für $x \in (0, \ell)$ und $t \in \mathbb{R}$ sei $u(x, t)$ die Temperatur des Stabes zum Zeitpunkt t an der Stelle x . Die Anfangsverteilung der Temperatur sei durch eine Funktion $u_0(x)$ gegeben. An den Enden des Stabes bieten sich verschiedene Randbedingungen an, die physikalisch motiviert sind. Zum einen kann man annehmen, dass man an den Enden eine feste Temperatur τ hat, o.B.d.A. nehmen wir $\tau = 0$ an, oder eine vollständige Isolierung, d.h. keine Temperaturänderung durch den Rand, d.h. $u_x(0, t) = u_x(\ell, t) = 0$ für alle $t \in \mathbb{R}$. Die erste Randbedingung wird nach DIRICHLET⁸ benannt, die zweite nach NEUMANN⁹. An der Stelle (x, t) ist dabei die Differentialgleichung

$$(1.1.19) \quad \frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

³Leonhard Euler (15.4.1707–18.9.1783) hinterließ ein äußerst umfangreiches wissenschaftliches Werk und erzielte in allen mathematischen Bereichen bahnbrechende Fortschritte. Er wurde zum Wegbereiter eines modernen Funktionenbegriffes und legte damit den Grundstein zum Studium von Differentialgleichungen. Die Herausgabe seines vollständigen Werkes ist bis heute nicht abgeschlossen. Er verbrachte längere Zeit an der Akademie der Wissenschaften in Potsdam und am Hofe der Zarin in St. Petersburg.

⁴Joseph Louis Lagrange (25.1.1736–10.4.1813) war Mathematiker, Physiker und Astronom. Er arbeitete zunächst über Variationsprobleme. Auf Einladung von Friedrich II verbrachte er 20 Jahre in Berlin und verfaßte hier unter anderem sein Werk *Mécanique analytique*. Neben seinen Beiträgen zur Analysis (nach ihm sind eine Restgliedformel und der Multiplikator benannt) stammen auch algebraische Erkenntnisse von ihm.

⁵Johann I Bernoulli (6.8.1667–1.1.1748) war jüngerer Bruder von Jakob I Bernoulli, von dem er die Mathematik lernte, sich aber später mit ihm überwarf. Er lehrte in Groningen und Basel und schuf bedeutende Beiträge zur Analysis, insbesondere löste er das Problem der schwingenden Saite und arbeitete zur Variationsrechnung.

⁶Jean-Baptist le Rond d'Alembert (17.11.1717–29.10.1783) war einer der bekanntesten Gelehrten seiner Zeit. Er arbeitete zunächst über Hydrodynamik. Sein Hauptwerk „*Traité de dynamique*“ widmete sich der klassischen Mechanik und ihrer Mathematisierung. Er bemühte sich die physikalische Umwelt mathematisch zu beschreiben und die dabei auftretenden Probleme zu lösen, u.a. beschrieb er die Bewegung der schwingenden Saite durch eine Differentialgleichung.

⁷Bernhard Riemann (17.9.1826–20.7.1866) war Sohn eines Pastors und studierte auch anfänglich Theologie. Seine Dissertation widmete sich den Grundlagen der Funktionentheorie. In seinem Habilitationsvortrag legte er den Grundstein für ein modernes Verständnis der Geometrie. Obwohl er nicht einmal vierzig Jahre alt wurde, hat er die Mathematik und Physik grundlegend beeinflusst.

⁸Johann Peter Gustav Lejeune Dirichlet (13.2.1805–5.5.1859) bewies den großen Fermat'schen Satz für $n = 5$. Bekannt sind vor allem die nach ihm benannten Reihen, die in der Zahlentheorie eine wichtige Rolle spielen, und sein Beitrag zur Variationsrechnung. Er wurde Nachfolger von Gauß in Göttingen, lehrte und forschte in vielen Gebieten der Mathematik. Herausragend sind seine Leistungen in der Zahlentheorie und in der Theorie der Differentialgleichungen.

⁹Franz Ernst Neumann (11.9.1798–23.5.1895) arbeitete vor allem zur mathematischen Physik.

erfüllt. Zur Vereinfachung setzen wir $k = 1$. Wieder macht man den Ansatz $u(x, t) = v(x)w(t)$. Dann erhält man

$$\frac{w'}{w} = \frac{v''}{v} = -\lambda.$$

Wir nehmen an, $\lambda > 0$. Dann lautet eine mögliche Lösung

$$u(x, t) = e^{\lambda t}(c_1 \cos(\sqrt{\lambda}x) + c_2 \sin(\sqrt{\lambda}x)).$$

Aus der Randbedingung am linken Rand ergibt sich $c_1 = 0$, und die Randbedingung am rechten Rand ergibt $\sin(\sqrt{\lambda}\pi) = 0$, also

$$\lambda = -n^2$$

für eine natürliche Zahl n . Da man beliebige Summen (Reihen) bilden kann, lautet eine sehr allgemeine Lösung

$$(1.1.20) \quad u(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n e^{-n^2 t} \sin(nx).$$

Die Werte für c_n bestimmt man durch Entwicklung von u_0 in eine Fourierreihe, siehe z.B. DYM & MCKEAN[9]

• Das elektrische Feld

Sei \mathbf{E} ein elektrisches Feld in der Ebene mit Komponenten $\mathbf{E}=(\mathbf{P}, \mathbf{Q})$. Sei \mathbf{U} das Potential dieses Feldes. Also $\mathbf{E}=\nabla\mathbf{U}$, wobei \mathbf{U} eine Funktion der beiden unabhängigen Veränderlichen x, y ist. Wir stellen uns die Frage, welches sind die Linien, längs denen das Potential konstant ist. An fast allen Punkten (x, y) wird entweder $x = x(y)$ eine Funktion von y sein, oder umgekehrt $y = y(x)$ eine Funktion von x . Wir beschränken uns auf den zweiten Fall, der erste geht daraus durch einfaches Umschreiben hervor. Um die Äquipotentiallinien zu finden, geben wir uns eine, zunächst beliebige, Konstante c vor und stellen die Frage, wo ist $\mathbf{U}=c$? Die Annahme, dass diese Linie durch $y = y(x)$ zu beschreiben ist, führt auf $\mathbf{U}(x, y(x)) = c$ und differenzieren nach x ergibt

$$(1.1.21) \quad \frac{d}{dx}\mathbf{U}(x, y(x)) = \frac{\partial\mathbf{U}}{\partial x} + \frac{\partial\mathbf{U}}{\partial y} \frac{dy}{dx} = 0.$$

Dies ist ein Beispiel einer **exakten** Differentialgleichung. Allgemeiner sind diese folgendermaßen definiert:

Definition 1.1.22 Die Differentialgleichung habe die Form

$$(1.1.23) \quad f(x, y) \frac{dy}{dx} + g(x, y) = 0.$$

Gibt es eine Funktion $\mathbf{U}: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, so dass

$$(1.1.24) \quad f(x, y) = \frac{\partial\mathbf{U}}{\partial y}, \quad g(x, y) = \frac{\partial\mathbf{U}}{\partial x},$$

so nennt man die Gleichung (1.1.23) **exakt**.

Bei exakten Differentialgleichungen sind die Niveaulinien von \mathbf{U} immer aus Trajektorien der Gleichung zusammengesetzt: ist $U(x_0, y_0) = c$ und $f(x_0, y_0) \neq 0$, so ist

$$\frac{\partial U}{\partial y}(x_0, y_0) = f(x_0, y_0) \neq 0$$

und der Satz über implizite Funktionen garantiert eine lokale Darstellung der Menge

$$\left\{ (x, y) \mid U(x, y) = c \right\}$$

in der Form

$$\left\{ (x, y(x)) \mid |x - x_0| < \delta \right\}$$

für ein geeignetes $\delta > 0$. Nun ist

$$U(x, y(x)) = c \text{ und daher } \frac{d}{dx}U(x, y(x)) = 0.$$

Also hat man

$$0 = \frac{d}{dx}U(x, y(x)) = \frac{\partial}{\partial x}U(x, y) + \frac{\partial}{\partial y}U(x, y)y'(x) = g(x, y) + f(x, y)y'.$$

Hat man die Niveaulinien gefunden, kann man oft auch noch die Trajektorien bestimmen.

Aus $U_{xy} = U_{yx}$ erhält man unmittelbar die notwendige Bedingung

$$f_x = g_y$$

für die Exaktheit einer Gleichung. Ist bei einer Gleichung der Form (1.1.23) die Bedingung (1.1.24) nicht erfüllt, so ist es manchmal möglich, einen **integrierenden Faktor** zu finden. Dies ist eine Funktion $M(x, y)$, so dass Mf bzw. Mg die Bedingung (1.1.24) erfüllen. Eine Diskussion der Gleichung ist dann der Diskussion einer exakten Gleichung ähnlich. Insbesondere führt die Forderung $(Mg)_y = (Mf)_x$ auf die partielle Differentialgleichung

$$M_y g + M g_y = M_x f + M f_x.$$

1.2 Die ersten numerischen Schritte

In diesem kurzen Abschnitt wollen wir das erste einfache numerische Verfahren zur Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen besprechen und auf die genannten Problemstellungen anwenden. Wir betrachten ein Anfangswertproblem bestehend aus einer gewöhnlichen Differentialgleichung und einem Anfangswert der Form

$$\dot{x} = f(t, x), \quad x(0) = x_0$$

auf dem \mathbb{R}^n und wollen einen Algorithmus zur Bestimmung einer Näherungslösung entwickeln. Der einfachste Zugang ist die Überlegung

$$\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x(t+h) - x(t)}{h} = f(t, x),$$

und daraus entsteht

$$x(t+h) = x(t) + h * f(x, t).$$

Eine Programmiersprache, die sich speziell eignet, Algorithmen auf einfache Weise in Programme umzuwandeln, ist die Sprache `matlab`. Das zugehörige `matlab`-Programm sieht wie folgt aus (bei gegebenem $x_0 \in \mathbb{R}$, $t_0 \in \mathbb{R}$, einer Schrittweite $sw > 0$ und einer Endzeit $t_1 \in \mathbb{R}$)

```
x = x0
t = t0
h = sw
while t < t1
    x = x + h * f(t, x)
    t = t + h
end
```

Das angegebene Programm berechnet eine Näherungslösung, jedoch wird diese erst mit Sinn erfüllt, wenn man entweder durch eine graphische Ausgabe oder durch geeignete Aufbereitung der Resultate diese in verständlicher Form darstellen kann.

Dabei wird auf natürliche Weise die Frage nach einer graphischen Darstellung der Resultate gestellt. Je nach Fragestellung mag die Antwort unterschiedlich ausfallen, wir präsentieren zwei Beispiele in `matlab`:

1. Wir initialisieren einen Wert $i=0$ und fügen in die obige `while`-Schleife noch die Befehle `i=i+1` und `y(i)=x` (oder im Falle eines Vektors x den Befehl `y(i)=x(k)` für einen Index k) ein. Danach erhält man mit dem einfachen Kommando `plot(y)` einen Auftrag zur graphischen Ausgabe der entsprechenden Komponente über der Zeit. Das vollständige Programm sieht dann wie folgt aus, wobei f in einer eigenen Datei abgelegt wird.

```
x = x0
t = t0
h = sw
i = 0
while t < t1
    y(i) = x
    x = x + h * f(t, x)
```

```

        t = t + h
        i = i + 1
    end

    plot y

```

2. Oft will man jedoch eine andere Darstellung: Wir betrachten dies anhand der Pendelgleichung und setzen $x_1(t) = x(t)$ und $x_2(t) = x'(t)$ und stellen nun jeweils den Wert des Vektors $(x_1(t), x_2(t))$ dar. Hier sieht das vollständige Programm wie folgt aus

```

x = x0
t = t0
h = sw
i = 0
while t < t1
    y1(i) = x(1)
    y2(i) = x(2)
    x = x + h * f(t, x)
    t = t + h
    i = i + 1
end

plot(y1,y2)

```

Ein Beispiel für die Pendelgleichung ist das folgende Programm (zu speichern in einer Datei pendel.m (innerhalb des matlab-Suchpfades)):

```

t = 0
t1 = 80
x = [0, 1.915]
h = 0.005
i = 1
while t < t1
    e1(i) = x(1);
    e2(i) = x(2);
    x = x + h * h_osc(t, x);
    t = t + h;
    i = i + 1;
end
plot(e1,e2)

```

dabei wird noch eine Datei mit dem Namen h_osc.m folgendes Inhaltes

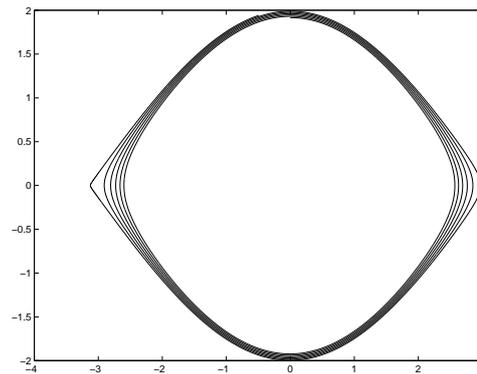


Abbildung 1.2: Das mathematische Pendel, der Anfangswert ist innerhalb der sogenannten Separatrix gewählt. Die Separatrix trennt Gebiete von Anfangswerten mit speziellen Eigenschaften (solchen mit Überspringen von solchen ohne). Sie selbst besteht aus Lösungskurven, die jedoch nicht leicht zu finden sind und den Übergang vom oberen Gleichgewicht zum oberen Gleichgewicht beschreiben. Die Frage, ob das Bild das wirkliche Lösungsverhalten korrekt wiedergibt, wird uns noch beschäftigen.

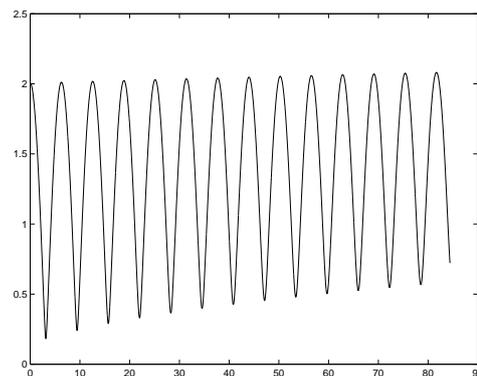


Abbildung 1.3: Das mathematische Pendel mit Anfangswert außerhalb der sogenannten Separatrix.

```
function v=h_osc(t,x)
v=[x(2),-sin(x(1))];
```

benötigt. Es liefert die Graphik in Abbildung 1.2. Ändert man den Anfangswert der zweiten Komponente auf $x(2) = 2.005$, so erhält man Abbildung 1.3 Ein interessantes Verhalten liefert der Anfangswert 1.91535, siehe Abbildung 1.4.

1.3 Bezeichnungen

Die folgenden Bezeichnungen sind Standard und werden regelmäßig gebraucht werden. Einige werden erst später erklärt.

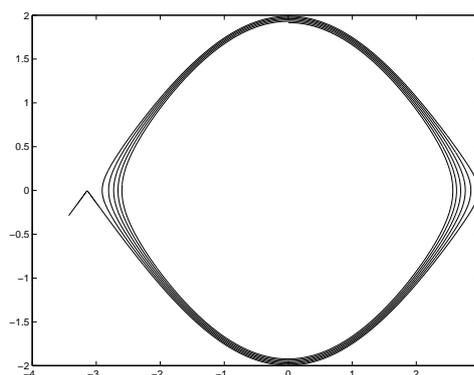


Abbildung 1.4: Die numerisch berechnete Lösung scheint für diesen Anfangswert innerhalb, der Seperatrix zu starten, zu einem späteren Zeitpunkt zeigt sie jedoch das Verhalten der Lösung von außerhalb.

\mathbb{N}	natürliche Zahlen
\mathbb{N}_0	$\mathbb{N} \cup \{0\}$
\mathbb{Z}	ganze Zahlen
\mathbb{Q}	rationale Zahlen
\mathbb{R}	reelle Zahlen
\mathbb{C}	komplexe Zahlen
$i\mathbb{R}$	die imaginäre Achse
\mathbb{R}^n	n -dimensionaler reeller Vektorraum mit üblichen Strukturen
u'	Ableitung einer Funktion die auf \mathbb{R} definiert ist
\dot{u}	wie eben, unabhängige Veränderliche ist die Zeit t
$\exp(\cdot)$	Exponentialfunktion
$ \cdot $	Betrag einer reellen Zahl oder Norm im \mathbb{R}^n
$\ \cdot\ $	Norm in einem Banachraum
\mathbf{X}, \mathbf{Y}	metrische Räume oder Banachräume
M, N	Mannigfaltigkeiten
$T_x M$	Tangentialraum an M in $x \in M$
TM	Tangentialbündel von M
$C(A, B)$	Raum der stetigen Funktionen von $A \rightarrow B$
$\text{Lip}(A, B)$	Raum der Lipschitz-stetigen Funktionen
∂U	Rand einer Menge U
$\text{dist}(A, B)$	Abstand zweier Mengen: $\inf\{d(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$

1.4 Hilfsmittel aus der Analysis

In diesem Abschnitt wollen wir einige Begriffe einführen, bzw. wiederholen, die für eine einfache und geschlossene Behandlung der Theorie unumgänglich sind.

1.4.1 Der Kontraktionssatz (Banachs Fixpunktsatz)

Definition 1.4.1 Sei \mathbf{X} eine Menge, $d : \mathbf{X} \times \mathbf{X} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Abbildung. Das Paar (\mathbf{X}, d) heißt **metrischer Raum**, falls d den folgenden Forderungen genügt: Für alle $(x, y, z) \in \mathbf{X} \times \mathbf{X} \times \mathbf{X}$ gilt:

M2 $d(x, y) = 0 \iff x = y$

M3 $d(x, y) = d(y, x)$

M4 $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$ (Dreiecksungleichung)

Aus diesen Axiomen folgt sofort:

Lemma 1.4.2 $d(x, y) \geq 0 \quad \forall (x, y) \in \mathbf{X} \times \mathbf{X}$.

Beweis. $d(x, y) = \frac{1}{2}(d(x, y) + d(x, y)) = \frac{1}{2}(d(x, y) + d(y, x)) \geq \frac{1}{2}d(x, x) \geq 0. \quad \square$

Definition 1.4.3 Es sei (\mathbf{X}, d) ein metrischer Raum.

(a) Eine Folge $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbf{X}$ nennt man **Cauchyfolge**¹⁰, wenn zu jedem $\varepsilon > 0$ eine natürliche Zahl $N \in \mathbb{N}$ existiert mit

$$n > N, m > N \Rightarrow d(x_n, x_m) < \varepsilon.$$

(b) Ein metrischer Raum \mathbf{X} heißt **vollständig**, wenn zu jeder Cauchyfolge $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ in \mathbf{X} ein Element $\bar{x} \in \mathbf{X}$ existiert, so dass gilt

$$\bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n.$$

Dies bedeutet natürlich: Zu jedem $\varepsilon > 0$ existiert ein $N \in \mathbb{N}$, so dass gilt

$$n > N \Rightarrow d(x_n, \bar{x}) < \varepsilon.$$

Eine reiche Klasse von metrischen Räumen sind normierte Vektorräume. Wir werfen einen Blick darauf.

¹⁰Augustin-Louis Cauchy (21.8.1789-22.5.1857) war Sohn eines hohen Beamten und genoß demzufolge eine gute Privatausbildung. Nach einem ingenieurwissenschaftlichen Studium eignete er sich nebenbei Werke von Lagrange an. Im Jahr 1811 löste er ein Problem, das Lagrange formuliert hatte. Er arbeitete über Integrale, Strömungsmechanik und Elastizitätstheorie. Speziell die Arbeiten zum letztgenannten Bereich machten ihn zu einem der bekanntesten Mathematiker seiner Zeit. Im weiteren arbeitete er auf vielen Gebieten, sein Hauptarbeitsgebiet wurde die Analysis mit der Theorie von Differentialgleichungen. Nach Gauß begann er mit komplexen Zahlen und der zugehörigen Analysis zu arbeiten. Cauchy war sehr produktiv und dies sehen wir noch heute an vielen Konzepten, die seinen Namen tragen.

Definition 1.4.4 Sei \mathbf{X} ein reeller Vektorraum.

(a) Man nennt $(\mathbf{X}, \|\cdot\|)$ einen **normierten Raum**, falls $\|\cdot\|$ eine Abbildung $\|\cdot\| : \mathbf{X} \rightarrow \mathbb{R}$ ist, so dass

1. $\|x\| = 0 \iff x = 0$;
2. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\| \forall (x, y) \in \mathbf{X} \times \mathbf{X}$;
3. $\|\alpha x\| = |\alpha| \|x\| \forall \alpha \in \mathbb{R}, \forall x \in \mathbf{X}$

gilt.

Wieder folgt sofort:

Lemma 1.4.5 $\|x\| \geq 0 \forall x \in \mathbf{X}$.

Beweis. $\|x\| = \frac{1}{2}(\|x\| + \|x\|) = \frac{1}{2}(\|x\| + \|(-1) \cdot x\|) \geq \frac{1}{2}\|x + (-1) \cdot x\| = \frac{1}{2}\|0\| = 0$. \square

Ohne Beweis geben wir das folgende (triviale) Lemma an.

Lemma 1.4.6 Mit

$$(1.4.7) \quad d(x, y) = \|x - y\|$$

wird ein normierter linearer Raum $(\mathbf{X}, \|\cdot\|)$ zum metrischen Raum (\mathbf{X}, d) .

Definition 1.4.8 Ist ein normierter, linearer Raum $(\mathbf{X}, \|\cdot\|)$ bezüglich der Metrik aus (1.4.7) vollständig, so bezeichnet man ihn als **Banachraum**, nach BANACH¹¹.

Definition 1.4.9 Sei (\mathbf{X}, d) ein metrischer Raum. Eine Abbildung $T : \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{X}$ heißt **schwache Kontraktion**, falls für alle (x, y) in $\mathbf{X} \times \mathbf{X}$ gilt:

$$(1.4.10) \quad d(Tx, Ty) < d(x, y).$$

T nennt man **stark kontrahierend**, wenn es ein $\lambda \in (0, 1)$ gibt, so dass für alle $(x, y) \in \mathbf{X} \times \mathbf{X}$ gilt

$$(1.4.11) \quad d(Tx, Ty) \leq \lambda d(x, y).$$

Satz 1.4.12 (Banach) Es sei (X, d) ein vollständiger metrischer Raum. Jede stark kontrahierende Abbildung $T : \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{X}$ hat einen eindeutig bestimmten Fixpunkt $\bar{x} \in \mathbf{X}$.

¹¹Stefan Banach (30.3.1892-31.8.1945), polnischer Mathematiker, war der Begründer der Theorie linearer, normierter Räume und ihren linearen Abbildungen. Seine Arbeiten sind die Grundlage der modernen Funktionalanalysis. Er und seine Schüler zeigten viele Anwendungen der Funktionalanalysis auf.

Beweis. Wir zeigen zunächst die Eindeutigkeit. Angenommen x_1, x_2 sind Fixpunkte. Dann ist

$$d(x_1, x_2) = d(Tx_1, Tx_2) < \lambda d(x_1, x_2).$$

Also ist $d(x_1, x_2) = 0$ und wegen (M2) folgt $x_1 = x_2$. Wir kommen zur Existenz. Sei $x_0 \in \mathbf{X}$ beliebig. Wir konstruieren die Folge $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbf{X}$ durch $x_n = Tx_{n-1}$ und behaupten, dass dies eine Cauchyfolge ist. Dazu sei $\varepsilon > 0$ gegeben. Für $m, n \in \mathbb{N}$, $m > n \geq 1$ ergibt sich mit (M4)

$$d(x_m, x_n) \leq d(x_m, x_{m-1}) + \cdots + d(x_{n+1}, x_n) = \sum_{j=n}^{m-1} d(x_{j+1}, x_j)$$

Für ein j im angegebenen Bereich schließt man

$$d(x_{j+1}, x_j) = d(T^j x_1, T^j x_0) \leq \lambda^j d(x_1, x_0).$$

Also hat man

$$d(x_m, x_n) \leq \sum_{j=n}^m \lambda^j d(x_1, x_0) \leq \sum_{j=n}^{\infty} \lambda^j d(x_1, x_0) < \varepsilon$$

solange nur n genügend groß ist. Mit der Vollständigkeit von (X, d) ergibt sich die Konvergenz der Folge $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$. Mit \bar{x} bezeichnen wir den Grenzwert. Der letzte Schritt besteht darin die Fixpunkteigenschaft des Grenzwertes nachzuweisen. Dazu sei $\varepsilon > 0$ gegeben und $N \in \mathbb{N}$, so dass $n > N$ impliziert

$$d(x_n, \bar{x}) < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Dann ist für $n > N$

$$\begin{aligned} d(T\bar{x}, \bar{x}) &\leq d(T\bar{x}, x_n) + d(x_n, \bar{x}) \\ &= d(T\bar{x}, Tx_{n-1}) + d(x_n, \bar{x}) \\ &\leq \lambda d(\bar{x}, x_{n-1}) + d(x_n, \bar{x}) \\ &\leq 2d(x_n, \bar{x}) \\ &< \varepsilon. \end{aligned}$$

Da $\varepsilon > 0$ beliebig ist, ist

$$d(T\bar{x}, \bar{x}) = 0$$

und damit

$$T\bar{x} = \bar{x}.$$

□

Bemerkung 1.4.13 Ein alternativer Beweis für die Fixpunkteigenschaft besteht in der Beobachtung, dass T stetig ist (warum?) und dem Diagramm

$$\begin{array}{ccc} x_{n+1} & = & Tx_n \rightarrow T\bar{x} \\ \downarrow & & \\ \bar{x} & & \end{array}$$

Satz 1.4.14 (Stetige Abhängigkeit) Sei (\mathbf{X}, d) ein vollständiger metrischer Raum, (\mathbf{Y}, d') ein metrischer Raum. Ferner sei für jedes $y \in \mathbf{Y}$ eine starke Kontraktion $T_y : \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{X}$ mit Kontraktionskonstante λ_y gegeben. Es sei $s = \sup_{y \in \mathbf{Y}} \lambda_y < 1$. Für jedes $x \in \mathbf{X}$ sei die Abbildung

$$F_x : \mathbf{Y} \rightarrow \mathbf{X} : y \mapsto T_y x$$

stetig. Dann ist auch die Abbildung

$$(1.4.15) \quad G : \mathbf{Y} \rightarrow \mathbf{X} : y \mapsto \bar{x}_y,$$

stetig, wobei \bar{x}_y durch $T_y \bar{x}_y = \bar{x}_y$ definiert ist.

Beweis. Fixiere $y_0 \in \mathbf{Y}$. Wir zeigen die Stetigkeit in y_0 . Sei \bar{x}_0 der zugehörige Fixpunkt von T_{y_0} . Dann gilt für den Fixpunkt \bar{x}_y von T_y ,

$$(1.4.16) \quad \begin{aligned} d(\bar{x}_y, \bar{x}_0) &= d(T_y \bar{x}_y, T_{y_0} \bar{x}_0) \\ &\leq d(T_y \bar{x}_y, T_y \bar{x}_0) + d(T_y \bar{x}_0, T_{y_0} \bar{x}_0) \\ &\leq \lambda_y d(\bar{x}_y, \bar{x}_0) + d(T_y \bar{x}_0, T_{y_0} \bar{x}_0). \end{aligned}$$

Es folgt

$$(1 - s)d(\bar{x}_y, \bar{x}_0) \leq (1 - \lambda_y)d(\bar{x}_y, \bar{x}_0) \leq d(T_y \bar{x}_0, T_{y_0} \bar{x}_0).$$

Wegen $s < 1$ darf man durch $(1 - s)$ teilen und die Behauptung folgt aus der Stetigkeit von F_{x_0} . \square

1.4.2 Mannigfaltigkeiten

In diesem kurzen Abschnitt führen wir den Begriff der Mannigfaltigkeit soweit ein, dass wir Anfangswertprobleme auf Mannigfaltigkeiten diskutieren können. Dies macht die Theorie nicht schwieriger, führt aber oft zu entscheidenden Vereinfachungen der Beschreibung von Lösungen von Differentialgleichungen. Oft ist allein die Geometrie eines Vorgangs so einschränkend, dass es sinnvoll ist, sich diese Einschränkungen zunutze zu machen. Man denke an das Pendel. Die Geometrie zwingt zur Bewegung auf einer Kreislinie. Zur Beschreibung des Zustandes benötigt man zwei Variablen in $S^1 \times \mathbb{R}$, den Winkel (nimmt nur Werte auf der Kreislinie an) und die Winkelgeschwindigkeit, welche Werte in \mathbb{R} annehmen kann. Eine Beschreibung in \mathbb{R}^2 würde vier Größen benötigen, zwei für den Ort, zwei für die Geschwindigkeit.

Der Begriff der Mannigfaltigkeiten ist eine naheliegende Verallgemeinerung des Begriffes der Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n , nur dass wir nun auf den umgebenden Raum, sowohl bei der Definition, wie auch bei der technischen Bewältigung der damit verbundenen Probleme verzichten wollen. Bei Untermannigfaltigkeiten hat man Sätze zum lokalen Geradebiegen und Sätze die Gleichwertigkeit von Parametrisierung und von der Beschreibung als (lokales) Nullstellengebilde. Hier fehlen solche Techniken. Trotzdem werden wir auf keine der Begriffsbildungen verzichten müssen.

Ausgangspunkt für diese Überlegungen ist das mathematische Pendel: Umgebungen von Punkten sehen aus wie Umgebungen von Punkten in \mathbb{R} , lokal ist unser Raum homöomorph zu \mathbb{R} , wenn auch die **globale** Gestalt sehr unterschiedlich ist: S^1 ist kompakt und \mathbb{R} ist nicht kompakt. (Man beachte, dass Kompaktheit unter Homöomorphismen erhalten bleibt!)

Definition 1.4.17 *Es sei (M, d) ein metrischer Raum. Gibt es zu jedem Punkt $x \in M$ eine offene Umgebung $U_x \subset M$, welche homöomorph zu einer offenen Menge im \mathbb{R}^n ist, so nennen wir den Raum **lokal euklidisch**.*

Lemma 1.4.18 *Ist M zusammenhängend und lokal euklidisch, so ist n unabhängig von x .*

Beweis. Wir benutzen eine Aussage aus der Analysis, die nicht offensichtlich ist, vgl. DEIMLING [10], sind zwei offene Mengen $U \subset \mathbb{R}^n$ und $V \subset \mathbb{R}^m$ homöomorph, so ist $m = n$. Sind nun $U_x \cap U_y \neq \emptyset$, $\tau_x : U_x \rightarrow V_x \subset \mathbb{R}^n$, $\tau_y : U_y \rightarrow V_y \subset \mathbb{R}^m$ Homöomorphismen, so ist

$$\tau_y \circ \tau_x^{-1} : \tau_x(U_x \cap U_y) \rightarrow \tau_y(U_x \cap U_y)$$

ein Homöomorphismus zwischen offenen Mengen in \mathbb{R}^n und \mathbb{R}^m und damit ist $n = m$. Daraus folgt, dass die Menge der Punkte $C(n) = \left\{ x \in M \mid \tau_x : U_x \rightarrow \mathbb{R}^n \right\}$ offen ist und offenes Komplement besitzt. Da M zusammenhängend ist, ist $C(n) = \emptyset$ oder $C(n) = M$. \square

Während wir für die Abbildungen τ_x nicht mehr verlangen können, als dass es Homöomorphismen sind, bilden die Abbildungen $\tau_y \circ \tau_x^{-1} : \tau_x(U_x \cap U_y) \rightarrow \tau_y(U_x \cap U_y)$ offene Mengen in euklidischen Räumen auf ebensolche Mengen ab und wir können Differenzierbarkeitseigenschaften für diese Abbildungen fordern.

Definition 1.4.19 1. Sei $\{U_x \subset M \mid x \in M\}$ eine offene Überdeckung von M . Eine Familie von Homöomorphismen $\tau_x : U_x \rightarrow V_x$, wobei $V_x \subset \mathbb{R}^n$ eine offene Teilmenge ist, so dass für je zwei Abbildungen τ_x, τ_y gilt

$$(1.4.20) \quad \tau_x \circ \tau_y^{-1} : \tau_y(U_x \cap U_y) \rightarrow \tau_x(U_x \cap U_y)$$

ist ein Diffeomorphismus und r -mal stetig differenzierbar, nennt man einen C^r -Atlas auf M . Einen Atlas bezeichnen wir mit \mathcal{A} .

2. Ist \mathcal{A} ein C^r -Atlas, $\tau \in \mathcal{A}$ eine Abbildung mit zugehörigem Definitionsbereich U , so nennen wir τ eine C^r -Karte und U eine **Koordinatenumgebung**. Die Abbildung

$$\tau_x \circ \tau_y^{-1} : \tau_y(U_x \cap U_y) \rightarrow \tau_x(U_x \cap U_y)$$

nennen wir **Kartenwechseldiffeomorphismus**.

3. Zwei C^r -Atlanten $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ sind **äquivalent**, wenn für zwei Koordinatenumgebungen $(\tau_1, U_1), (\tau_2, U_2)$ mit $\tau_1 \in \mathcal{A}_1, \tau_2 \in \mathcal{A}_2$ gilt,

$$(1.4.21) \quad \tau_1 \circ \tau_2^{-1} : \tau_2(U_1 \cap U_2) \rightarrow \tau_1(U_1 \cap U_2)$$

ist r -mal stetig differenzierbar.

4. Eine Äquivalenzklasse Σ von C^r -Atlanten $[\mathcal{A}]$ wird als C^r -**differenzierbare Struktur** auf M bezeichnet.
5. Ist Σ eine C^r -differenzierbare Struktur auf M , so nennt man das Paar (M, Σ) eine C^r -**Mannigfaltigkeit**.
6. Ist M zusammenhängend, so sind (nach Lemma 1.4.18) alle Bilder von Koordinatenumgebungen im gleichen Raum \mathbb{R}^n . Die Zahl n heißt die **Dimension** der Mannigfaltigkeit.

Bemerkung 1.4.22 Die in Punkt 3 definierte Äquivalenz ist, wie man leicht nachprüft, tatsächlich eine Äquivalenzrelation. Damit wird die Definition in Punkt 4 sinnvoll.

Beispiel 1.4.23

- **Der euklidische Raum**

Hier definiert man durch eine Karte (id, \mathbb{R}^n) einen Atlas (bestehend aus eben dieser Karte). Dessen Äquivalenzklasse gibt dann eine differenzierbare Struktur.

- **Sphären**

Die Einheitskugel S^n im \mathbb{R}^{n+1} ist gegeben durch

$$S^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid |x| = 1\}.$$

Die Definition von Koordinatenumgebungen kann auf verschiedene Weisen erfolgen; eine Möglichkeit ist, jede Halbkugel

$$H_j^\pm = \left\{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid \sum_{i=1}^n x_i^2 = 1, \pm x_j > 0 \right\}$$

durch

$$\tau_j : H_j^\pm \rightarrow \mathbb{R}^{n-1} (\mathbf{x} \mapsto \hat{\mathbf{x}}_j)$$

mit $2n$ Karten zu versehen.

- **Tori**

Die Definition der Tori ist eine erste interessante Konstruktion mit Mannigfaltigkeiten. Wir betrachten den \mathbb{R}^n und darin \mathbb{Z}^n als additive **Untergruppe**. Wir führen auf \mathbb{R}^n eine Äquivalenzrelation ein, indem wir zwei Punkte äquivalent nennen, falls sie sich um einen Vektor in \mathbb{Z}^n unterscheiden. Sei \mathbf{T}^n die Menge der Äquivalenzklassen bezüglich dieser Relation. Als Metrik führt man ein

$$(1.4.24) \quad d'([x], [y]) = \inf \{d(x, y) \mid x' \in [x], y' \in [y]\},$$

wobei d die euklidische Metrik auf dem \mathbb{R}^n ist. Das Nachprüfen der Eigenschaften einer Metrik geht wie folgt:

1. Dass $d'([x], [x]) = 0$ gilt, ist elementar:

$$0 \leq d'([x], [x]) \leq \inf\{d(x, y) \mid x \in [x]\} = 0.$$

Ist $d'([x], [y]) = 0$ so gibt es Folgen $\{\mathbf{x}_j\}_{j \in \mathbb{N}} \subset [x]$ und $\{\mathbf{y}_j\}_{j \in \mathbb{N}} \subset [y]$ mit $d(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) \rightarrow 0$ für $j \rightarrow \infty$. OBdA dürfen wir annehmen, dass alle \mathbf{x}_j in $[0, 1]^n$ liegen (kann man durch Addition eines Elementes in \mathbb{Z}^n immer erreichen). Da jede Klasse $[x]$ die Menge $[0, 1]^n$ in genau einem Punkt schneidet, folgt aus der Annahme, dass die Folge der \mathbf{x}_j konstant ist, sagen wir \mathbf{x} ist. Nun konvergiert die Folge der $\{\mathbf{y}_j\}_{j \in \mathbb{N}}$ gegen \mathbf{x} , d.h. zu $\varepsilon < \frac{1}{4}$ gibt es ein $N \in \mathbb{N}$, so dass alle \mathbf{y}_j , $j > N$ in $B_\varepsilon(\mathbf{x})$ liegen. Die Klasse $[y]$ schneidet aber einen Ball mit Radius $\frac{1}{4}$ in genau einem Punkt, also ist für $j > N$ die Folge der \mathbf{y}_j konstant. Insbesondere folgt aus der Konvergenz, dass für $j > N$ $\mathbf{y}_j = \mathbf{x}$. Also sind die Klassen gleich.

2. Die Symmetrie der Metrik d' folgt sofort aus der Symmetrie von d .
3. Die Dreiecksungleichung erhält man, indem man zwei Punkte $x' \in [x]$ und $y' \in [y]$ wählt, die den Abstand minimieren. (Solche Punkte findet man wie folgt: Sei $x' \in [x]$ beliebig. Es ist $B_{100}(x') \cap \{\bar{y} \in \mathbb{R}^n \mid \bar{y} \in [y]\}$ kompakte Teilmenge von \mathbb{R}^n , also gibt darin es ein y' , welches minimalen Abstand zu x' hat.) Dann gilt für jedes $z \in [z]$, dass

$$d'([x], [y]) = d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y).$$

Beim Übergang zum Infimum auf der rechten Seite entsteht das Problem, dass das Infimum in beiden Termen für verschiedene $z \in [z]$ angenommen werden könnte. Sei also $d'([x], [z]) = d(x, z')$ und $d'([y], [z]) = d(y, z)$. Dann erhält man durch Verschieben (die Metrik d ist translationsinvariant!), dass $d'([x], [z]) = d(x', z)$ für ein geeignetes $x' \in [x]$ ist. Dann hat man $d'([x], [z]) = d(x', z)$ und

$$d'([x], [y]) \leq d(x', y) \leq d(x', z) + d(y, z) = d'([x], [z]) + d'([y], [z]).$$

Um Karten zu definieren, betrachten wir für $x \in \mathbb{R}^n$ die Kugel $K(x)$ mit Radius $1/4$ um x . Sie schneidet jede Äquivalenzklasse höchstens einmal. Sei $\rho_x : K(x) \rightarrow \mathbf{T}^n$ gegeben durch die Einschränkung der Abbildung $x \mapsto [x]$. Da jede Klasse höchstens einen Punkt in dieser Kugel besitzt, ist die Abbildung injektiv und deswegen umkehrbar. Für je zwei Punkte $y_1, y_2 \in K(x)$ gilt $d'(\rho_x(y_1), \rho_x(y_2)) = d(y_1, y_2)$. Deswegen ist ρ_x ein Homöomorphismus und gleiches gilt natürlich für die Umkehrung $\tau_x = \rho_x^{-1}$. Insgesamt ergibt sich, dass \mathbf{T}^n eine C^∞ -differenzierbare Mannigfaltigkeit ist. \mathbf{T}^n wird als n -Torus bezeichnet.

Definition 1.4.25 Eine Abbildung $\gamma : \mathbb{R} \rightarrow M$ heißt **differenzierbar**, wenn für jede Karte τ aus einem Atlas in Σ gilt, dass $\tau \circ \gamma$ differenzierbar ist. Entsprechendes gilt für höhere Ableitungen.

Allgemeiner definiert man differenzierbare Abbildungen zwischen zwei Mannigfaltigkeiten. Wir werden dies benötigen, um Differentialgleichungen hinschreiben zu können.

Definition 1.4.26 Seien (M, Σ) , (N, Σ') differenzierbare Mannigfaltigkeiten. Eine Abbildung $f : M \rightarrow N$ heißt **differenzierbar**, wenn für je zwei Karten τ, τ' aus Σ, Σ' gilt, dass

$$\tau' \circ f \circ \tau^{-1} : \tau(U) \rightarrow \tau'(U')$$

differenzierbar ist.

Lemma 1.4.27 1. Eine Abbildung $\gamma : \mathbb{R} \rightarrow M$ ist im Punkt t_0 in \mathbb{R} genau dann differenzierbar, wenn für eine Karte $\tau_x : U_x \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit $\gamma(t_0) \in U_x$ gilt

$$\tau_x \circ \gamma \text{ ist in } t_0 \text{ differenzierbar.}$$

2. Eine Abbildung $f : M \rightarrow N$ ist genau dann im Punkt $x_0 \in M$ differenzierbar, wenn für eine Karte (τ, U) , $x_0 \in U \subset M$ und eine Karte (σ, V) , $f(x_0) \in V \subset N$ offen gilt

$$\sigma \circ f \circ \tau^{-1} : U \rightarrow \sigma(f(U) \cap V)$$

ist differenzierbar.

Beweis. Eine Richtung ist eine unmittelbare Konsequenz der Definition, die andere folgt einfach durch Anfügen eines geeigneten Kartenwechseldiffeomorphismus. \square

Bemerkung 1.4.28 Euklidische Räume seien immer mit der differenzierbaren Struktur versehen, welche durch die Identität definiert wird.

Definition 1.4.29 Sei (M, Σ) eine differenzierbare Mannigfaltigkeit, und $\gamma_{1,2} : \mathbb{R} \rightarrow M$ seien differenzierbare Abbildungen (Kurven) mit $x_0 = \gamma_1(0) = \gamma_2(0)$. Wir sagen, γ_1 und γ_2 sind im Punkt x_0 **tangential**, in Zeichen $\gamma_1 \sim_0 \gamma_2$, wenn für jede Koordinatenumgebung (τ, U) von $\gamma_1(0)$ gilt

$$(\tau \circ \gamma_1)'(0) = (\tau \circ \gamma_2)'(0).$$

Eine einfache Überlegung liefert:

Lemma 1.4.30 1. \sim_0 ist eine Äquivalenzrelation.

2. Ist für eine Karte τ die Beziehung $(\tau \circ \gamma_1)'(0) = (\tau \circ \gamma_2)'(0)$ erfüllt, so ist sie für jede Karte richtig.

Beweis.

1. Die Symmetrie und die Reflexivität der Relation sind klar. Die Transitivität folgt ebenfalls unmittelbar.
2. Sind $(\tau_x, U_x), (\sigma_x, V_x)$ zwei Karten mit $x = \gamma_1(0) = \gamma_2(0) \in U_x \cap V_x$. Dann ist $\sigma_x = (\sigma_x \circ \tau_x^{-1})\tau_x$. Ist nun

$$(\tau_x \circ \gamma_1)'(0) = (\tau_x \circ \gamma_2)'(0)$$

so bleibt die Gleichheit unter $(\sigma_x \circ \tau_x^{-1})'$ erhalten und überträgt sich damit auf die Karte (σ_x, V_x) . □

Definition 1.4.31 Sei $[\gamma]_0$ eine Äquivalenzklasse, der Relation \sim_0 . Eine Klasse $[\gamma]_0$ wird **Tangententialvektor** an M im Punkt $\gamma(0)$ genannt. Die Menge der Tangentialvektoren bei $x \in M$ bezeichnet man als **Tangentialraum** im Punkt x , wir schreiben dafür $T_x M$.

Aufgabe 1.4.32 Zeigen Sie, dass dieses Konzept von Tangentialvektoren für Kurven in \mathbb{R}^n äquivalent zum üblichen Begriff ist.

Lemma 1.4.33 Die Menge $T_x M$ bildet einen reellen Vektorraum, dessen Dimension mit der Dimension der Mannigfaltigkeit zusammenfällt.

Beweis. Wir müssen zeigen, dass man Tangentialvektoren an M im Punkt $x \in M$ in geeigneter Weise mit Skalaren multiplizieren kann und auch eine Addition möglich ist. Seien dazu $[\gamma]_0, [\gamma_{1,2}]_0$ drei Tangentialvektoren an M bei x , $\lambda \in \mathbb{R}$ ein Skalar und (τ, U) eine Koordinatenumgebung von $x \in M$. Die Kurven $\gamma, \gamma_{1,2}$ seien Repräsentanten der Tangentialvektoren $[\gamma]_0, [\gamma_1]_0$, bzw. $[\gamma_2]_0$. Wir setzen

$$(1.4.34) \quad \lambda[\gamma]_0 = [\tau^{-1}(\lambda(\tau \circ \gamma))]_0$$

und

$$(1.4.35) \quad [\gamma_1]_0 + [\gamma_2]_0 = [\tau^{-1}(\tau \circ \gamma_1 + \tau \circ \gamma_2 - \tau(x))]_0.$$

Zunächst muss gezeigt werden, dass diese Verknüpfungen unabhängig von den Repräsentanten und unabhängig von der gewählten Karte (τ, U) ist. Wir führen dies nur in einem, dem einfacheren, Fall aus. Angenommen, $\gamma, \bar{\gamma}$ seien beide Repräsentanten von $[\gamma]_0$. Aufgrund der Definition ist $\gamma(0) = \bar{\gamma}(0) = x$. Wir müssen nun zeigen, dass für jede Karte (σ, U) , die bei x definiert ist, gilt

$$(\sigma \circ \tau^{-1}(\tau \circ \gamma))'(0) = (\sigma \circ \tau^{-1}(\tau \circ \bar{\gamma}))'(0).$$

Eine einfache Anwendung der Produktregel liefert als Ergebnis, dass beide Seiten gleich sind. Wählt man in der Konstruktion eine andere Karte $\tilde{\tau}$, so muss wiederum für eine beliebige Karte σ gezeigt werden, dass

$$\sigma(\tau^{-1}(\lambda\tau \circ \gamma))'(0) = \sigma(\tilde{\tau}^{-1}(\lambda\tilde{\tau} \circ \gamma))'(0)$$

ist. Da die Ableitung linear in λ ist, folgt das Ergebnis wieder aus der Produktregel. Die Dimension erhält man einfach durch Identifizierung von $[\gamma]_0$ mit $(\tau \circ \gamma)'(0)$ für eine feste Karte mit zugehöriger Koordinatenumgebung (τ, U) , wobei $\gamma(0) \in U$ liegt. □

Lemma 1.4.36 Gegeben sei eine Mannigfaltigkeit M , für $x \in M$ sei $T_x M$ der Tangentialraum. Wir setzen

$$TM = \bigcup_{x \in M} T_x M$$

und definieren Karten $\tau_{x,v} : TM \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$. Hier ist $(x, v) \in TM$, d.h. $x \in M$, $v \in T_x M$. Ferner sei (τ, U) eine Koordinatenumgebung von x . Für $y \in U$ und $w \in T_y M$ setzen wir

$$\tau_{x,v}(y, w) = (\tau_x(y), (\tau_x \circ \gamma)'(0)),$$

wobei γ eine Kurve ist, welche w repräsentiert.

Die Menge $\{(\tau_{x,v}, U_x \times T_x M) \mid x \in M, v \in T_x M\}$ bildet einen Atlas auf TM . Hat M eine C^k -differenzierbare Struktur, so ist TM eine C^{k-1} -differenzierbare Mannigfaltigkeit. Man beachte die Wahl der Topologie auf TM : wir wählen die grösste Topologie, so dass alle $\tau_{x,v}$ stetig sind.

Beweis. Nachzulesen in Büchern über Differentialtopologie. Siehe z.B. BRÖCKER & JÄNICH¹² [7]. □

Man beachte, dass die Konstruktion nicht von v abhängt.

Bemerkung 1.4.37 Den einzelnen Tangentialraum $T_x M$ bezeichnet man auch als **Faser** des Bündels TM .

Definition 1.4.38 Seien M, N differenzierbare Mannigfaltigkeiten, $f : M \rightarrow N$ eine differenzierbare Abbildung. Wir definieren die **tangentiale Abbildung** $Tf : TM \rightarrow TN$ faserweise durch $T_x f : T_x M \rightarrow T_{f(x)} N$, indem wir einen Tangentialvektor $v \in T_x M$, der durch eine Kurve γ repräsentiert wird, abbilden auf die Klasse $[f \circ \gamma]_0$.

Definition 1.4.39 1. Sei M eine differenzierbare Mannigfaltigkeit (wir werden in Zukunft auf die Schreibweise als Paar verzichten). Sei $\gamma : \mathbb{R} \rightarrow M$ eine Kurve (d.h. eine glatte Abbildung). Wir definieren den **Tangentialvektor** $[\gamma]_t$ für $t \in \mathbb{R}$ im Punkt $\gamma(t)$ durch den Tangentialvektor der Kurve $\gamma_1(s) = \gamma(t + s)$ im Punkt $\gamma_1(0)$.

2. Eine stetige Abbildung $v : M \rightarrow TM$ mit der Eigenschaft $v(x) \in T_x M$ für alle $x \in M$ heißt **Vektorfeld** auf M .
3. $w : M \times \mathbb{R} \rightarrow TM$ sei eine glatte Abbildung mit der Eigenschaft $w(x, t) \in T_x M$ für alle $(x, t) \in M \times \mathbb{R}$. Wir nennen w ein **zeitabhängiges Vektorfeld** auf M .
4. Gegeben sei ein (zeitabhängiges) Vektorfeld v . Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein reelles Intervall. Eine Kurve $\gamma : I \rightarrow M$ heißt **Lösungskurve** für v , wenn für jedes $t \in I$ der Tangentialvektor $[\gamma]_t$ der Kurve im Punkt $\gamma(t)$ mit $v(\gamma(t))$ bzw. mit $v(\gamma(t), t)$ übereinstimmt.

¹²T. Bröcker und K. Jänich sind an der Universität Regensburg tätige gegenwärtige Mathematiker.

Bemerkung 1.4.40 Ist $M = \mathbb{R}^n$, so ist natürlich $TM = \mathbb{R}^{2n}$. Jedoch identifiziert man üblicherweise die Tangentialvektoren wieder mit Punkten des Raumes und betrachtet dann Vektorfelder als Abbildungen $v : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ bzw. $v : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Dies macht manchmal die Schreibweise einfacher. Konzeptionell ist jedoch die Trennung einfacher. Im weiteren Verlauf werden wir uns ausschließlich dem Studium von Integralkurven von (zeitabhängigen) Vektorfeldern widmen.

Bemerkung 1.4.41 Hat man ein Vektorfeld $v : M \rightarrow TM$ auf einer Mannigfaltigkeit M , dann ist formal die tangentielle Abbildung Tv eine Abbildung von $TM \rightarrow T(TM)$. Im Spezialfall, dass $v(x) = 0 \in T_x M$ ist, kann man jedoch $T_x v$ als Abbildung $T_x M \rightarrow T_x M$ auffassen. Das sollte sich jede(r) selbst überlegen! Noch ein Hinweis: Viele Bilder zur Erläuterung der Konzepte findet man im Buch von CHILLINGWORTH [8] oder bei ARNOL'D [2].

Neben den bisher erwähnten Büchern über gewöhnliche Differentialgleichungen gibt es noch eine ganze Reihe von Büchern, die teilweise weit über das hier behandelte Material hinausgehen. Als Beispiele seien genannt: Amann [?], Hale [?], Hartman [?], Knobloch & Kappel [?], Palis & de Melo [?] und Walter [?].

1.5 Aufgaben

Aufgabe 1.5.1 Man überlege sich, ob ein Zerfallsgesetz $u(t)$, welches der Beziehung (1.1.8) genügt, auch eine Gleichung der Form (1.1.6) erfüllt.

Aufgabe 1.5.2 (a) Man begründe, dass jede Lösung der Gleichung (1.1.1) die Form Ce^x mit einer reellen Konstante C hat.

(b) Man gebe ein entsprechendes Argument für die Gleichung (1.1.4) und die Lösungen (1.1.5) an.

Aufgabe 1.5.3 Man löse die Gleichungen

(a) $u' = u^2 + 1$

(b) $u' = -\frac{x^2}{u^3}$

(c) $u' = e^u \sin(x)$

mit der Methode der **Trennung der Veränderlichen** und diskutiere das Verhalten der Lösungen mit $u(0) = p_0$, $p_0 \in \mathbb{R}$. Darunter verstehen wir die Beantwortung der folgenden Fragen.

- Für welche $t \in \mathbb{R}$ existiert die Lösung?
- Wie verhält sich die Lösung für $t \rightarrow t_+$, $t \rightarrow t_-$, wenn (t_-, t_+) das (maximale) Intervall bezeichnet, auf dem die Lösung $u(t)$ existiert?

Aufgabe 1.5.4 Man verifiziere die Aussagen über die logistische Gleichung:

(a) Für $p_0 \in (0, K)$ existiert die Lösung für alle Zeiten und strebt für $t \rightarrow \infty$ gegen K , für $t \rightarrow -\infty$ gegen Null.

(b) Für $p_0 > K$ existiert die Lösung nicht für alle reellen Zeiten. Man diskutiere das Verhalten.

(c) Man untersuche das Verhalten der Lösungen für $p_0 < 0$!

Aufgabe 1.5.5 Man diskutiere das System (1.1.16) für $K < 0$.

Aufgabe 1.5.6 Man überprüfe die folgenden Gleichungen auf Exaktheit, bestimme für die nicht exakten Gleichungen einen integrierenden Faktor und bestimme die Lösungen. Man beachte, dass die Gleichungen nicht überall Sinn machen. In diesen Fällen betrachte man eine äquivalente Differentialgleichung für die Funktion $x = x(y)$. Gibt es eine symmetrische Schreibweise?

1. $yy' = x$

2. $xy' = y$

3. $x - y + (-x + 1)y' = 0$

4. $4x + 3y^2 + 2xyy' = 0$

5. $xy^2 + y - xy' = 0$

Aufgabe 1.5.7 Man programmiere den oben genannten Algorithmus in matlab und stelle die Lösungen zu den oben genannten Modellproblemen für verschiedene Anfangs- und Parameterwerte graphisch dar und interpretiere die Ergebnisse.

Aufgabe 1.5.8 Man zeige, dass die Menge $C([0, 1], \mathbb{R}^n)$ der stetigen Funktionen auf dem Intervall $[0, 1]$ mit Werten im \mathbb{R}^n , versehen mit der Norm

$$\|u\| = \sup_{x \in [0, 1]} |u(x)|,$$

ein Banachraum ist.

Aufgabe 1.5.9 Wir betrachten die Abbildung

$$(1.5.10) \quad T : C([0, 1], \mathbb{R}^n) \rightarrow C([0, 1], \mathbb{R}^n) : u \mapsto \int_0^1 f(\cdot, y)u(y)dy,$$

wobei f eine auf $[0, 1] \times [0, 1]$ stetige, reellwertige Funktion ist. Man zeige, T ist stetig und linear. Ist T eine Kontraktion?

Aufgabe 1.5.11 Man beweise das Lemma 1.4.6.

Aufgabe 1.5.12 Man veranschauliche sich das Tangentialbündel an die Einheitskugel im \mathbb{R}^2 . Wie sehen typische Vektorfelder aus? Wie hat man sich das entsprechende auf dem Torus \mathbf{T}^2 vorzustellen.

Aufgabe 1.5.13 Für die Folge $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ aus dem Beweis zum Banachschen Fixpunktsatz beweise man die Fehlerabschätzung

$$d(x_{n+1}, \bar{x}) \leq \frac{\lambda^n}{1 - \lambda} d(x_1, x_0).$$

Kapitel 2

Allgemeine Existenzsätze

Im weiteren Verlauf der Vorlesung beschränken wir uns weitgehend auf Anfangswertprobleme gewöhnlicher Differentialgleichungen. Zunächst zeigen wir die Existenz von sogenannten Integralkurven. Dabei betrachten wir nicht den allgemeinsten Fall. Danach zeigen wir, dass, unter gewissen Annahmen, Integralkurven eindeutig sind. Daran anschließend werden stetige bzw. differenzierbare Abhängigkeit von den Parametern des Problems untersucht.

2.1 Nichtautonome Differentialgleichungen

2.1.1 Die Existenz von Integralkurven

Wir beginnen mit der Gleichung

$$(2.1.1) \quad \dot{u} = v(u, t),$$

wobei $V : M \times \mathbb{R} \rightarrow TM$ ein zeitabhängiges Vektorfeld auf einer Mannigfaltigkeit M ist. Gesucht werden Kurven $\gamma : \mathbb{R} \rightarrow M$, für die zu jedem Zeitpunkt $t \in \mathbb{R}$ gilt $T\gamma(t) = v(\gamma(t), t)$. Die Abbildung 2.1 zeigt links schematisch ein Vektorfeld und rechts wird versucht darzustellen, wie die Tangentialvektoren an die Lösungskurve das vorgegebene **Richtungsfeld** wiedergeben. Üblicherweise schreibt man $u(t)$ für $\gamma(t)$ und \dot{u} für $T\gamma(t)$. Hier wird stillschweigend vorausgesetzt, dass alle beteiligten Funktionen an der Stelle t ausgewertet werden. Nur wenn von dieser Konvention abgewichen wird, wird das Argument explizit angegeben. Einen wichtigen Spezialfall stellt die Gleichung

$$(2.1.2) \quad \dot{u} = f(u, t),$$

mit $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ dar. Man nennt die Differentialgleichung (2.1.2) **nichtautonom**, weil die Variable t explizit in der Gleichung auftritt. Natürlich können wir in den folgenden Ausführungen auch zulassen, dass das Vektorfeld nicht von t abhängt.

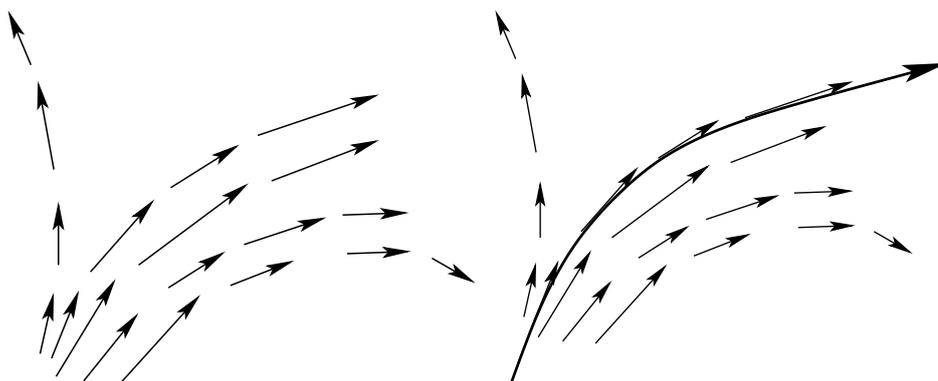


Abbildung 2.1: Links das vorgegebene Vektorfeld oder Richtungsfeld, rechts eine Kurve, deren Tangentialvektoren gerade mit dem Richtungsfeld übereinstimmen

Sei $(u_0, t_0) \in M \times \mathbb{R}$. Wir suchen ein Intervall $I \subset \mathbb{R}$ und eine Kurve $u : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit den Eigenschaften $t_0 \in I$,

$$(2.1.3) \quad u(t_0) = u_0$$

und für jedes $t \in I$ gilt $\dot{u}(t) = v(u(t), t)$, d.h. u erfüllt (2.1.1).

Definition 2.1.4 Wir nennen M den **Phasenraum**, $M \times \mathbb{R}$ den **erweiterten Phasenraum** und den Graphen der Abbildung

$$\mathbb{R} \rightarrow M \times \mathbb{R} : t \mapsto (u(t), t)$$

bezeichnen wir als **Integralkurve**.

Man beachte den Unterschied zwischen dieser Definition und der der Lösungskurve. **Man beachte den Sonderfall** $M = \mathbb{R}^n$. Bezüglich der Existenz von Integralkurven hat man den folgenden Satz, hier betrachten wir zunächst die Situation im \mathbb{R}^n . Zur Diskussion des Verhaltens benötigen wir noch einen Begriff.

Definition 2.1.5 Es sei $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig. Man nennt f bezüglich der ersten Variablen u **lokal Lipschitz¹-stetig**, wenn zu jedem Punkt $(u, t) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ eine Umgebung $W \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ und eine Konstante M_W existiert, so dass für je zwei Punkte $(u_1, t), (u_2, t) \in W$, mit gleicher zweiten Komponente, gilt

$$(2.1.6) \quad |f(u_1, t) - f(u_2, t)| \leq M_W (|u_1 - u_2|).$$

Außerdem benötigen wir noch folgendes Lemma:

¹Rudolf Otto Sigismund Lipschitz (14.5.1832-7.10.1903) studierte bei Neumann und Dirichlet. Er forschte sowohl in der Zahlentheorie, Differentialgeometrie, über Besselfunktionen, Fourier-Reihen wie auch über gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen und deren Umfeld.

Definition 2.1.7 Sei I ein Intervall und U eine Teilmenge des \mathbb{R}^n . Wir bezeichnen mit $C(I, U)$ den metrischen Raum der auf dem Intervall I definierten stetigen Funktionen mit Werten in U . Dabei benutzen wir die Supremumsmetrik

$$d(u, v) = \sup\{|u(t) - v(t)| \mid t \in I\}.$$

Wenn I abgeschlossen ist, können wir statt \sup auch \max schreiben. Die Supremumsmetrik heißt dann auch Maximumsmetrik.

Lemma 2.1.8 Wenn I ein abgeschlossenes Intervall und $U \subset \mathbb{R}^n$ kompakt ist, dann ist die Menge $C(I, U)$ mit der Maximumsmetrik ein vollständiger metrischer Raum.

Beweis. Wir prüfen die Eigenschaften nach:

1. Ist $u = v$, so ist natürlich $d(u, v) = 0$. Für die Umkehrung überlegt man sich, dass $d(u, v) = 0$ bedeutet, dass $\max\{|u(t) - v(t)| \mid t \in I\} = 0$ ist. Damit ist $u(t) - v(t) = 0$ für alle $t \in I$, und deswegen gilt $u = v$ auf I . Damit ist (M2) gezeigt.
2. Die Symmetrieaussage aus (M3) ist klar, da $|x - y|$ symmetrisch in x und y ist.
3. Die Dreiecksungleichung (M4) ist eine einfache Rechnung:

$$\begin{aligned} |u(t) - v(t)| &\leq |u(t) - z(t)| + |z(t) - v(t)| \quad \forall t \in I \\ &\leq \max\{|u(s) - z(s)| \mid s \in I\} + \max\{|z(s) - v(s)| \mid s \in I\} \\ &= d(u, z) + d(z, v). \end{aligned}$$

Da diese Ungleichung für alle $t \in I$ gilt, gilt sie auch für das Supremum, und damit gilt

$$d(u, v) \leq d(u, z) + d(z, v).$$

4. Es bleibt die Vollständigkeit: ist $\{u_m\}_{m \in \mathbb{N}}$ eine Cauchyfolge in $C(I, U)$, so ist jede Komponente eine Cauchyfolge in $C(I, \mathbb{R})$ und damit konvergent mit stetiger Grenzfunktion (Grenzfunktion einer gleichmäßig konvergenten Folge stetiger Funktionen ist stetig). Außerdem konvergiert die Folge gegen den komponentenweise erhaltenen Limes. Wegen Kompaktheit von U liegt diese wieder in $C(I, U)$.

Der folgende Satz zeigt die lokale Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen:

Satz 2.1.9 (Lokaler Existenz-Eindeutigkeits-Satz) Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, $I \subset \mathbb{R}$ ein offenes Intervall und $f : U \times I \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig und in der ersten Variablen lokal Lipschitz-stetig. Dann gibt es zu jedem $u_0 \in U$, $t_0 \in I$ eine Zahl $\delta > 0$ und eine auf dem Intervall $I_\delta = [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$ definierte stetige Funktion $u : I_\delta \rightarrow U$ mit folgenden Eigenschaften:

- u ist auf $(t_0 - \delta, t_0 + \delta)$ stetig differenzierbar;
- u genügt der Bedingung $u(t_0) = u_0$,
- u löst die Differentialgleichung $\dot{u} = f(u, t)$.

Wenn es ein weiteres Intervall \tilde{I} gibt, welches t_0 enthält, sowie eine Funktion $\tilde{u} : \tilde{I} \rightarrow U$ mit den Eigenschaften, dass $\tilde{u}(t_0) = u_0$ ist und dass \tilde{u} die Differentialgleichung $\dot{u} = f(u, t)$ löst, dann gilt $u = \tilde{u}$ auf $I_\delta \cap \tilde{I}$.

Beweis. Wähle eine Umgebung U' von u_0 in U und eine beschränkte Umgebung $W = U' \times (t_0 - \bar{\delta}, t_0 + \bar{\delta})$ von (u_0, t_0) in $U \times I$, so dass auf W die Funktion f die Lipschitz Konstante M_W bezüglich der ersten Koordinate hat, mit der die Ungleichung (2.1.6) erfüllt ist, und $|f(u, t)| \leq N_W \forall (u, t) \in W$. Sei $\Delta = \inf\{|(x, t) - (u_0, t_0)| \mid (x, t) \in \mathbb{R}^{n+1} \setminus W\}$. Ist $\mathbb{R}^{n+1} \setminus W$ leer, so sei Δ eine beliebige positive Zahl. Wähle $\lambda \in (0, 1)$. Setze $M = \max\{1, M_W\}$, $N = \max\{1, N_W\}$ und

$$\delta = \frac{1}{3} \min \left\{ \frac{\Delta}{N}, \frac{3\lambda}{M}, \bar{\delta} \right\}.$$

Für $u \in C(I_\delta, U')$ definieren wir eine neue Funktion $Tu \in C(I_\delta, U')$ durch

$$(2.1.10) \quad (Tu)(t) = u_0 + \int_{t_0}^t f(u(s), s) ds.$$

Wir zeigen

1. T ist eine starke Kontraktion auf $C(I_\delta, U')$.
2. Der Fixpunkt u ist eine Funktion mit den gewünschten Eigenschaften, d.h.
 - (a) $u(t_0) = u_0$.
 - (b) u ist stetig differenzierbar
 - (c) u löst die Differentialgleichung.

Zu 1.) Zunächst prüfen wir, ob für $v \in C(I_\delta, U')$ auch Tv wieder in diesem Raum liegt. Die Stetigkeit von Tv ist nahezu offensichtlich. Um einzusehen, dass $Tv(t)$ in U' liegt, zeigen wir, dass $(Tv(t), t)$ in W liegt. Offensichtlich ist $(Tv(t_0), t_0) = (u_0, t_0) \in W$. Wegen der Stetigkeit von Tv folgt, dass die Menge $I_W = \{t \in I_\delta \mid (Tv(t), t) \in W\}$ offen in I_δ ist. Damit gibt es ein Intervall $(t_0 - \delta_1, t_0 + \delta_1)$ mit $\delta_1 \leq \delta$, so dass für $t \in (t_0 - \delta_1, t_0 + \delta_1)$ gilt $(Tv(t), t) \in W$. Dann ist aber auch $(Tv(t), t) \in W$ für $|t - t_0| = \delta_1$. Dazu schätzen

wir die Differenz $|Tv(t) - u_0|$ ab:

$$\begin{aligned}
 |(Tv(t), t) - (u_0, t_0)| &\leq \left| \int_{t_0}^t f(v(s), s) ds \right| + \delta_1 \\
 &\leq \int_{t_0}^t |f(v(s), s)| ds + \delta_1 \\
 &\leq \delta_1 N_U + \delta_1 \\
 &\leq \delta(1 + N) \\
 &< \Delta.
 \end{aligned}$$

Damit ist $(Tv(t), t) \in W$. Deshalb ist das maximale Intervall in I_W , welches t_0 enthält, offen und abgeschlossen. D.h., die t_0 enthaltende Komponente von I_W ist offen und abgeschlossen in I_δ . Da t_0 in I_W liegt, gilt $I_W = I_\delta$.

Wir kommen zur Kontraktionseigenschaft. Seien $v, w \in C(I_\delta, U')$. Dann ist

$$\begin{aligned}
 d(Tv, Tw) &= \max\{|Tv(t) - Tw(t)| \mid t \in I_\delta\} \\
 &\leq \left| \int_{t_0}^t (f(v(s), s) - f(w(s), s)) ds \right| \\
 (2.1.11) \quad &\leq \int_{t_0}^t |f(v(s), s) - f(w(s), s)| ds \\
 &\leq \delta M_U d(v, w) \\
 &< \lambda d(v, w).
 \end{aligned}$$

Aus dem Kontraktionssatz 1.4.12 folgt nun die Existenz von genau einem Fixpunkt von T .

Zu 2.) Ist $Tu = u$ so gilt für $t \in I_\delta$

$$(2.1.12) \quad u(t) = u_0 + \int_{t_0}^t f(u(s), s) ds.$$

Damit ist klar, dass u im Inneren des Intervalls stetig differenzierbar ist. Die Ableitung $\dot{u}(t)$ ist nach dem Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung gleich $f(u(t), t)$. Wie schon vorher bemerkt, gilt auch (2.1.3). \square

Korollar 2.1.13 Seien U, f wie im Satz 2.1.9. Die Konstanten Δ, M, N seien wie im Beweis angegeben. Dann existiert auf jedem Intervall I_δ mit $\delta < \min\{\frac{\Delta}{2N}, \frac{1}{M}\}$ eine Lösung des Anfangswertproblems (2.1.2), (2.1.3).

Beweis. Bitte selbst einfügen!

□

Der eben bewiesene Satz wird oft nach den Mathematikern *Picard*² und *Lindelöf*³ benannt. Ohne Beweis möchte ich den Satz von Peano⁴ angeben, der eine Verallgemeinerung der Existenzaussage darstellt.

Satz 2.1.14 (Peanos lokaler Existenzsatz) *Ist $U \subset \mathbb{R}^n$ offen und $f : U \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig, $(u_0, t_0) \in U \times \mathbb{R}$, so besitzt das Anfangswertproblem $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$ eine Lösung (lokal in der Zeit, d.h. es existiert ein Intervall I_δ und eine Funktion $u : I_\delta \rightarrow U$, welche $\dot{u} = f(u, t)$ und $u(t_0) = u_0$ erfüllt).*

Bemerkung 2.1.15 *Man beachte, dass in diesem Satz die Eindeutigkeitsaussage des vorherigen Satzes nicht gemacht wird. Sie wäre auch falsch, wie das Beispiel $\dot{x} = \sqrt{x}$ lehrt. Eine genauere Diskussion dieses Beispiels folgt in den Übungen.*

Nun wollen wir die dem obigen lokalen Existenz- und Eindeutigkeitsatz entsprechende Aussage für Anfangswertaufgaben auf Mannigfaltigkeiten beweisen.

Satz 2.1.16 *Es sei M eine differenzierbare Mannigfaltigkeit, $v : M \times \mathbb{R} \rightarrow TM$ ein C^1 -glattes Vektorfeld, $x_0 \in M$ und $t_0 \in \mathbb{R}$ gegeben, so existiert ein $\delta > 0$ und eine Umgebung U von x_0 in M , so dass eine eindeutig bestimmte Lösung $x : [t_0 - \delta, t_0 + \delta] \rightarrow U$ des Anfangswertproblems $\dot{x} = v(x, t)$, $x(t_0) = x_0$ existiert.*

²Charles Emile Picard (24.7.1856-11.12.1941) lehrte an der Sorbonne in Paris. Bekannt sind neben dem Existenz- und Eindeutigkeitsatz in der Theorie der Differentialgleichungen die Sätze zur Werteverteilung holomorpher Funktionen, die den Satz von Casorati-Weierstraß verschärfen. Picard wirkte auch in anderen Bereichen der Mathematik.

³Ernst Leonard Lindelöf (7.3.1870-4.6.1946) ist finnischer Mathematiker und Begründer der finnischen Funktionentheorieschule. Seine Hauptarbeitsgebiete sind die Analysis und die Funktionentheorie.

⁴Giuseppe Peano (27.8.1858-20.4.1939) bewies im Jahre 1887, dass die Stetigkeit der rechten Seite hinreichend für die Lösbarkeit von gewöhnlichen Differentialgleichungen ist. Seine Axiome, die die natürlichen Zahlen charakterisieren, stammen aus dem Jahr 1889. Kurz danach fand er die nach ihm benannte den Raum füllende Kurve. Er beeinflusste die Mengenlehre, reformierte den Mathematikunterricht an italienischen Schulen und war einer der Initiatoren des ersten internationalen Mathematikerkongresses in Zürich im Jahre 1897.

Beweis. Zunächst wollen wir nochmals klären, was es genau bedeutet, dass $v : M \times \mathbb{R} \rightarrow TM$ C^1 -glatt ist. Dazu benötigen wir Karten und Koordinatenumgebungen (τ_x, U_x) , bzw. $(\tau_{x,v}, TM \cap p^{-1}(U_x))$, wobei $p : TM \rightarrow M$ für $v \in T_x M$ durch $p(v) = x$ definiert ist. Zu überprüfen ist nun die Glattheit der Abbildung $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{2n}$

$$\tau_x(U) \rightarrow \tau_x(U) \times \mathbb{R}^n : (y, v_y) \mapsto (y, (\tau_x \circ \gamma_{v_y})'(0)v_y).$$

Dann ist die Abbildung $f(y, t) = (\tau_x \circ \gamma_{v_y})'(0)v_y$ Lipschitz stetig und es existiert lokal in der Zeit eine Lösung des Anfangswertproblems

$$\dot{y} = f(y, t), \quad y(t_0) = \tau_{x_0}(x_0).$$

Durch $\tau_{x_0}^{-1}(y(t))$ wird eine Kurve auf M mit den gewünschten Eigenschaften definiert. Zu zeigen ist noch, dass die angegebene Konstruktion unabhängig von der Wahl der Karten ist. \square

2.1.2 Fortsetzbarkeit

Schon bei der Diskussion der logistischen Gleichung trat das Phänomen auf, dass Lösungen nicht für alle Zeiten existieren müssen. Wir wollen dies nun vertiefen.

Definition 2.1.17 (a) Wir betrachten das Anfangswertproblem $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$. Sei $u : I \rightarrow W$ eine Lösung. Man nennt eine Lösung u_1 , welche auf einem Intervall I_1 definiert ist, eine **Fortsetzung** von u , wenn $I \subset I_1$ gilt und zusätzlich auf I die Funktionen u und u_1 übereinstimmen.

(b) Ein Intervall $I \subset \mathbb{R}$ heißt maximales Existenzintervall, wenn es eine Funktion $u : I \rightarrow W$ gibt, welche $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$ löst, so dass aus

$$u_1 : I_1 \rightarrow W \text{ ist Fortsetzung von } u$$

folgt, $I = I_1$.

Lemma 2.1.18 (Maximale Existenzintervalle) Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, $I \subset \mathbb{R}$ ein offenes Intervall, $f : U \times I \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine stetige, in der ersten Variablen Lipschitz-stetige Abbildung. Dann gilt für Lösungen des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$

1. Jede Lösung besitzt eine Fortsetzung auf ein maximales Existenzintervall.
2. Maximale Existenzintervalle sind offen.
3. Für das Verhalten von u am Rand des maximalen Existenzintervall (t_1, t_2) des genannten Anfangswertproblems erhält man die folgende Alternative (sei T einer der Randpunkte, d.h. $T \in \{t_1, t_2\}$):

- $T = \infty$ oder $T = -\infty$,

$$\lim_{t \rightarrow T, t \in (t_1, t_2)} u(t)$$

existiert oder auch nicht.

- $|T| < \infty$, dann gilt: Zu jedem Kompaktum $K \subset U$ gibt es ein $\delta > 0$, so dass

$$|t - T| < \delta, t \in (t_1, t_2) \Rightarrow u(t) \notin K.$$

Beweis. Die erste Behauptung folgt aus den beiden Beobachtungen:

- Sind I_1, I_2 offene Intervalle $u_1 : I_1 \rightarrow \mathbb{R}^n$ und $u_2 : I_2 \rightarrow \mathbb{R}^n$, $u_0 \in I_1 \cap I_2$ Lösungen des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$ so gibt es eine Lösung dieses Problems, welche auf $I_1 \cup I_2$ definiert ist. Denn aufgrund der Eindeutigkeitsaussage des Satzes 2.1.9 stimmen u_1 und u_2 auf $I_1 \cap I_2$ überein. Außerhalb des Durchschnitts setzt man $u(t) = u_1(t)$, falls $t \in I_1$ und $u(t) = u_2(t)$ andernfalls.
- Die Vereinigung von allen Intervallen auf denen Lösungen des Anfangswertproblems existieren, ist wieder ein Intervall. An jedem Punkt in diesem Intervall stimmen alle dort definierten Lösungen überein.

Die zweite Behauptung ist offensichtlich. Warum?

Zum Beweis der dritten Aussage unterscheiden wir die beiden Fälle

1. $|T| = \infty$
2. $|T| < \infty$.

Im ersten Fall ist nichts zu zeigen. Der zweite Fall bedarf einer Überlegung. Angenommen, es gäbe ein Kompaktum $K \subset W$ und eine Folge $\{t_i\}_{i \in \mathbb{N}}$, $t_i \in (t_1, t_2) \forall i$ und $\lim_{i \rightarrow \infty} t_i = T$ mit $w_i = u(t_i) \in K \forall i \in \mathbb{N}$. Dann hat die Folge $\{w_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ einen Häufungspunkt $w_0 \in K \subset W$. Aufgrund des Existenzsatzes 2.1.9 gibt es eine Lösung $w_i : J_i \rightarrow W$, wobei $J_i \subset \mathbb{R}$ ein Intervall ist und $w(t_i) = w_i$. Nun sei U eine Umgebung von (w_0, T) mit einer Lipschitzkonstante $M = M_U$. Wir setzen

$$\Delta = \frac{1}{2} \inf\{|(w_0, T) - (w, t)| \mid (w, t) \in \mathbb{R}^{n+1} \setminus U\}.$$

Sei $\delta < \frac{1}{M} \min\{\Delta, 1\}$. Dann existiert nach Korollar 2.1.13 jede Lösung mit Anfangswert

$$|(w_a, t_a) - (w_0, T)| < \Delta$$

zumindest auf dem Intervall $(t_a - \delta, t_a + \delta)$. Weiter existiert ein $N \in \mathbb{N}$, so dass aus $i > N$ folgt $|(w_i, t_i) - (w_0, T)| < \Delta$ und $|t_i - T| < \delta$. Dann existiert aber die Lösung durch (w_i, t_i) auf dem Intervall $(t_i - \delta, t_i + \delta)$. Dies enthält aber T als inneren Punkt, im Widerspruch zur Annahme, dass T Endpunkt des maximalen Existenzintervalls ist. \square

Bemerkung 2.1.19 Die Aussage in Teil (c) kann man folgendermaßen interpretieren. Entweder die Lösung des Anfangswertproblems existiert für alle Zeiten, oder wenn dies nicht der Fall ist, so konvergiert sie bei Annäherung an einen Endpunkt des maximalen Existenzintervalls gegen den Rand ∂W von W oder gegen Unendlich. Es stellt sich die Frage, ob man einfache Bedingungen für *globale Existenz* angeben kann. Darunter verstehen wir die Frage, wann die Lösung des Anfangswertproblems (2.1.2), (2.1.3) für alle $t \in \mathbb{R}$ existiert. Eine einfache hinreichende Bedingung wird im nächsten Satz angegeben.

Satz 2.1.20 (Globale Existenz) Sei $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ Lipschitz-stetig mit einer globalen Lipschitzkonstante M . Dann existieren für alle Anfangswerte u_0 die Lösungen des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$ für alle $t \in \mathbb{R}$.

Beweis. Dies folgt, wenn wir zeigen können, dass für jeden Anfangswert $(u_0, t_0) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ die zugehörige Lösung $u(t)$ auf einem Intervall I_δ existiert mit einem δ , welches nicht von (u_0, t_0) abhängt. (Wie?) Dies ist eine direkte Konsequenz des Korollars 2.1.13, denn Δ ist beliebig, M ist unabhängig vom Paar (u_0, t_0) und N läßt sich durch Δ und M nach oben abschätzen. \square

Wir können nun den globalen Existenzsatz für kompakte Mannigfaltigkeiten beweisen.

Satz 2.1.21 (Globale Existenz auf Mannigfaltigkeiten) Es sei M eine kompakte Mannigfaltigkeit, $v : M \times \mathbb{R} \rightarrow TM$ ein C^1 -glattes Vektorfeld. Dann gibt es zu jedem Paar $x_0 \in M$, $t_0 \in \mathbb{R}$ eine eindeutig bestimmte Lösung $x : \mathbb{R} \rightarrow M$ des Anfangswertproblems $\dot{x} = v(x, t)$, $x(t_0) = x_0$. Diese Lösung bezeichnen wir mit $x(t, t_0, x_0)$.

Beweis. Dies folgt sofort aus dem Beweis von Lemma 2.1.18. \square

2.2 Stetige Abhängigkeit

In diesem Abschnitt wollen wir die Abhängigkeit der Lösung vom Anfangswert und von Parametern untersuchen. Was wollen wir darunter verstehen? Wir gehen zurück zu einem unserer Beispiele vom Anfang, z.B. zur Pendelgleichung und betrachten eine Lösung dieser Gleichung zu einem bestimmten Anfangswert. Nun können wir uns die Frage stellen, was passiert, wenn wir den Anfangswert leicht verändern, oder wenn wir z.B. ℓ die charakteristische Größe des Pendels ein wenig variieren oder aber unser Pendel an einem anderen Ort aufstellen und die Schwerkraft ein wenig anders: werden wir ein Lösungsverhalten beobachten, das der ersten Lösung ähnlich sieht, oder erwarten wir ein ganz anderes Verhalten?

Wir werden zeigen, dass zu einem gegebenen Zeithorizont $T > 0$ Umgebungen des Anfangswertes, der Länge ℓ und der Schwerkraft g existieren, so dass im Intervall ${}_T, T$

die Lösung zu jedem Anfangswert, zu jeder Fadenlänge und zu jedem Schwerkraftwert aus diesen Umgebungen in der Nähe der zunächst betrachteten Lösung liegen.

Wichtig ist dabei natürlich, die Tatsache, dass wir eine feste Zeit $T > 0$ fixieren. Auf beliebig großen Intervallen ist eine vergleichbare Aussage nicht zu erwarten. Wir werden am Ende des Semesters darauf zurückkommen.

Wir führen zunächst die folgenden Schreibweisen ein, die sich als geeignet erweisen, der gestellten Frage einen vernünftigen Rahmen zu geben.

Definition 2.2.1 Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ eine offene Teilmenge, $I \subset \mathbb{R}$ ein offenes Intervall, $f : U \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine stetige, bezüglich der ersten Variablen lokal Lipschitz-stetige Abbildung, und $t_0 \in I$. Eine Lösung $u : I \rightarrow U$ des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$ wollen wir mit $u(t, t_0, u_0)$ bezeichnen, d.h.

$$\frac{du}{dt}(t, t_0, u_0) = f(u(t, t_0, u_0), t)$$

für alle $t \in I$ und

$$u(t_0, t_0, u_0) = u_0.$$

Soll die **Abhängigkeit** von der rechten Seite f ausgedrückt werden, so schreiben wir $u(t, t_0, u_0, f)$. Hängt f von Parametern $\lambda \in \mathbf{Y}$ ab, wobei \mathbf{Y} ein metrischer Raum ist, so bezeichnen wir die Abhängigkeit der Lösung von dem Parameter durch $u(t, t_0, u_0, \lambda)$.

Wir werden zeigen: Die Lösung der Differentialgleichung hängt stetig von allen Parametern u_0 , t_0 ab – sogar von f . Zur Vorbereitung benutzen wir folgendes wichtige Lemma, das auf den schwedisch-amerikanischen Mathematiker Gronwall⁵ zurückgeht:

Lemma 2.2.2 (Gronwall) Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall, $u : I \rightarrow \mathbb{R}_+$ eine stetige Funktion, welche für zwei positive Konstanten α , β , für ein $t_0 \in I$ und alle $t \in I$ der Abschätzung

$$(2.2.3) \quad u(t) \leq \alpha + \beta \int_{t_0}^t u(s) ds$$

genügt. Dann gilt für alle $t \in I$

$$(2.2.4) \quad u(t) \leq \alpha e^{\beta|t-t_0|}.$$

Setzt man in (2.2.3) die strikte Ungleichung voraus, so gilt auch in (2.2.4) eine echte Ungleichheit.

⁵Thomas Hakon Gronwall (16.1.1877-9.5.1932), gebürtiger Schwede, studierte in Uppsala und Stockholm Mathematik und Ingenieurwesen. Ab 1902 war er für zwei Jahre an der TU Berlin-Charlottenburg. Danach war er in den USA tätig.

Beweis. Sei

$$v(t) = \int_{t_0}^t u(s) ds.$$

Damit schreibt sich (2.2.3) um zu

$$\dot{v} \leq \alpha + \beta v.$$

Setze $w(t) = v(t)e^{-\beta t}$. Differenzieren von w ergibt

$$\begin{aligned} \dot{w}(t) &= \dot{v}(t)e^{-\beta t} - \beta v(t)e^{-\beta t} \\ &\leq (\alpha + \beta v(t))e^{-\beta t} - \beta v(t)e^{-\beta t} \\ &= \alpha e^{-\beta t}. \end{aligned}$$

Integration dieser Ungleichung (auf beiden Seiten stehen ausschließlich nichtnegative Funktionen) zwischen t_0 und t führt zu (man beachte $w(t_0) = 0$)

$$w(t) \leq \frac{\alpha}{\beta} |e^{-\beta t} - e^{-\beta t_0}|.$$

Damit ergibt sich für v ,

$$v(t) \leq \frac{\alpha}{\beta} |1 - e^{\beta(t-t_0)}|,$$

oder

$$v(t) \leq \frac{\alpha}{\beta} e^{\beta|t-t_0|} - \frac{\alpha}{\beta}.$$

Für $u(t)$ erhält man aus Gleichung 2.2.3 und der Definition von v

$$u(t) \leq \alpha + \beta v(t) \leq \alpha + \alpha e^{\beta|t-t_0|} - \alpha.$$

Man beachte, dass eine strikte Ungleichung in (2.2.3) zu einer echten Ungleichheit in jeder dieser Abschätzungen führt. \square

Bemerkung 2.2.5 *Es gibt allgemeinere Versionen dieses Lemmas, von denen wir später noch einige kennenlernen werden.*

Satz 2.2.6 (Stetige Abhängigkeit von Anfangsdaten auf Mannigfaltigkeiten) *Sei M eine kompakte Mannigfaltigkeit, f ein (tangenciales) C^1 -Vektorfeld auf M . Dann ist die Lösung $u = u(t, t_0 = 0, u_0, f)$ des autonomen Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u)$, $u(0) = u_0$ in allen Variablen stetig. Hierbei wird der Abstand zwischen Funktionen in der C^1 -Metrik gemessen, d.h. für f_1 und f_2 in $C^1(M)$ ist der Abstand gegeben durch*

$$d_{C^1}(f_1, f_2) := \max_{x \in M} d(f_1(x), f_2(x)) + \max_{x \in M} \|df_1(x) - df_2(x)\|.$$

Der Satz besagt also: $\forall t > 0 \forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0$, so dass

$$\begin{aligned} \forall \tau_0 &\in [0 - \delta, t_0 + \delta], \\ \forall \tilde{u}_0 &\text{ mit } |u_0 - \tilde{u}_0| < \delta \\ \forall g, &\text{ welches ein } C^1\text{-Vektorfeld auf } M \text{ ist mit } d_{C^1}(f, g) < \delta \end{aligned}$$

gilt $\forall \tau \in [0, t]$:

$$|u(\tau, 0, u_0, f) - u(\tau, \tau_0, \tilde{u}_0, g)| < \varepsilon.$$

Beweis. Zunächst bemerken wir, dass wir hier nach wie vor Punkte $x \in M$ als Punkte im \mathbb{R}^{N_0} ansehen können für geeignetes N_0 . Denn jede kompakte Mannigfaltigkeit läßt sich in einen \mathbb{R}^{N_0} „einbetten“ (Einbettungssatz von Whitney). Das heißt: Wir dürfen rechnen wie zuvor (z.B. ist der Abstand auf M nach wie vor gegeben durch $d(x, y) = |x - y|$). Außerdem erhalten wir als zusätzlichen Bonus die Kompaktheit unserer Menge M . Dies erleichtert uns das Leben erheblich, denn wir können dadurch angenehmerweise auch die Aussage verwenden, dass alle Lösungen des Anfangswertproblems für alle Zeiten existieren (Satz (2.1.21) über die Existenz globaler Lösungen auf kompakten Mannigfaltigkeiten).

Ist $u(t)$ Lösung von $\dot{u} = f(u)$, $u(0) = u_0$ so hat u die Form

$$u(t) = u_0 + \int_0^t f(u(s)) ds.$$

Ist v die Lösung von

$$\dot{v} = g(v), \quad v(\tau_0) = v_0,$$

so gilt die entsprechende Formel

$$v(t) = v_0 + \int_{\tau_0}^t g(v(s)) ds.$$

Es gilt

$$u(\tau) - v(\tau) = u_0 - v(0) + \int_0^\tau f(u(s)) ds - \int_0^\tau g(v(s), s) ds.$$

Für die Beträge ergibt sich

$$|u(\tau) - v(\tau)| \leq |u_0 - v(0)| + \left| \int_0^\tau f(u(s)) ds - \int_0^\tau g(v(s), s) ds \right|.$$

Nun gilt, dass $\tilde{u}_0 = v(\tau_0)$ ist, so dass gilt:

$$|u_0 - v(0)| \leq |u_0 - \tilde{u}_0| + |v(\tau_0) - v(0)|.$$

Dabei ist der erste Summand durch δ beschränkt und der zweite durch $|\tau_0| \cdot \max_M |f|$, was endlich ist (wegen Kompaktheit von M) und sogar beliebig klein, denn $\max_M |f|$ ist fest und $|\tau_0| < \delta$ ist beliebig klein. Daher können wir die Summe durch geeignete Wahl von δ kleiner als jedes ε machen und erhalten

$$|u(\tau) - v(\tau)| < \varepsilon + \left| \int_0^\tau (f(u(s)) - g(v(s))) ds \right|.$$

Einfügen eines weiteren Termes und eine Anwendung der Dreiecksungleichung liefern:

$$|u(\tau) - v(\tau)| < \varepsilon + \int_0^\tau |f(u(s)) - f(v(s))| ds + \int_0^\tau |f(v(s)) - g(v(s))| ds.$$

Wir benutzen jetzt, dass (wegen $d_{C^1}(f, g) < \delta$) gilt, dass $|f - g| < \delta$ und dass $|(f - g)'| < \delta$. Wir setzen $K := \max_{x \in M} |f'(x)|$. Damit folgt:

$$\begin{aligned} |u(\tau) - v(\tau)| &< \varepsilon + \int_0^\tau K \cdot |u(s) - v(s)| ds + \int_0^\tau |f - g| ds \\ &\leq \varepsilon + \int_0^\tau K \cdot |u(s) - v(s)| ds + (t - 0)\delta. \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$|u(\tau) - v(\tau)| < 2\varepsilon + \int_0^\tau K |u(s) - v(s)| ds.$$

Wir benutzen nun Gronwalls Lemma und erhalten

$$|u(\tau) - v(\tau)| < 2\varepsilon e^{K(\tau-0)},$$

was beliebig klein ist, da K und τ beschränkt sind ($|\tau| \leq |t|$) und wir ε beliebig wählen können. \square

Übrigens konnten wir in diesem Fall wegen der Autonomie der Differentialgleichung annehmen, dass für unser Anfangswertproblem $\dot{u} = f(u)$, $u(t_0) = u_0$ der Anfangszeitpunkt t_0 gleich 0 ist, denn die Lösung ändert sich dadurch nur durch Zeit-Verschiebung: Wenn $u = u(t, t_0, u_0)$ die Lösung des AWP $\dot{u} = f(u)$, $u(t_0) = u_0$ ist und $\hat{u} = u(t, 0, u_0)$, dann gilt für alle $s \in \mathbb{R}$, dass $u(s) = \hat{u}(s + t_0)$. Diese Vereinfachung ($t_0 = 0$) funktioniert nur bei autonome Differentialgleichungen. Gleich beweisen wir noch einen ähnlichen Satz für nichtautonome Differentialgleichungen, wo wir den Parameter t_0 verwenden müssen und ihn nicht einfach durch 0 ersetzen dürfen.

Zur Vorbereitung für denselben Satz im \mathbb{R}^n brauchen wir ein paar Vorbereitungen. Wir müssen nämlich erst einmal eine geeignete Metrik auf dem Raum der Lipschitz-Funktionen im \mathbb{R}^n definieren. Die Metrik aus dem vorigen Satz sowie die meisten bekannten Metriken (z.B. C^0 -Abstand) funktionieren nämlich nur auf kompakten Mengen. (Was – nebenbei bemerkt – wieder einmal zeigt, dass Mathematik auf kompakten Mannigfaltigkeiten einfacher sein kann als im \mathbb{R}^n .)

Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ eine offene Teilmenge $I \subset \mathbb{R}$ ein offenes Intervall. Wir bezeichnen mit $\text{Lip}(U \times I, \mathbb{R}^n)$ die Menge aller Lipschitz-stetigen Funktionen auf $U \times I$ mit Werten in \mathbb{R}^n . Wir wollen einen Abstandsbegriff auf diesem Funktionenraum einführen. Dazu wählen wir eine abzählbare Familie von offenen Mengen

$$(2.2.7) \quad \{W_n\}_{n \in \mathbb{N}}$$

mit folgenden Eigenschaften:

1. Der Abschluss von W_n ist für jedes $n \in \mathbb{N}$ kompakt.
2. $\overline{W}_n \subset W_{n+1}$
3. $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} W_n = U \times I$

Damit kann man Pseudo-Metriken (der Begriff wird weiter unten erläutert) auf $\text{Lip}(U \times I, \mathbb{R}^n)$ durch

$$(2.2.8) \quad d_n(f, g) = \max_{(u,t) \in W_n} |f(u, t) - g(u, t)|$$

definieren. Diese wiederum geben uns die Möglichkeit eine Metrik auf $\text{Lip}(U \times I, \mathbb{R}^n)$ zu konstruieren. Wir setzen einfach

$$(2.2.9) \quad d_L(f, g) = \sum_{n=1}^{\infty} 2^{-n} \frac{d_n(f, g)}{1 + d_n(f, g)}$$

und fassen die notwendigen Beweisschritte im nächsten Lemma zusammen.

Lemma 2.2.10 1. *Es gibt Familien von offenen Mengen $\{W_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ mit den eben angegebenen Eigenschaften.*

2. *d_n ist eine Pseudo-Metrik, d.h. es sind alle Axiome einer Metrik außer dem Axiom M.2) erfüllt, stattdessen gilt nur noch die Implikation $x = y \Rightarrow d(x, y) = 0$.*

3. *d_L ist eine Metrik.*

4. *Eine Folge $f_n \in \text{Lip}(U \times I, \mathbb{R}^n)$ konvergiert genau dann bezüglich der Metrik d_L , wenn sie auf jedem Kompaktum gleichmäßig konvergiert.*

5. *Die Konvergenz von Funktionen ist unabhängig von der gewählten Familie $\{W_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ von offenen Mengen.*

Beweis. Die erste Aussage beweisen wir durch Angabe einer Familie mit den genannten Eigenschaften. Für $n \in \mathbb{N}$ setzen wir

$$W_n = \{(u, t) \mid |(u, t)| < n \text{ und } \text{dist}((u, t), \partial U \times \mathbb{R}) > \frac{1}{n}\}.$$

Man prüft leicht nach, dass diese Wahl zum gewünschten Ergebnis führt.

Die zweite Aussage ist klar. Natürlich ist d_n keine Metrik, stimmen nämlich f, g auf W_n überein und sind auf $U \times R$ verschieden, so ist $d_n(f, g) = 0$, obwohl $f \neq g$ gilt.

Bei der dritten Behauptung sind alle Aussagen bis auf M.2) und die Dreiecksungleichung trivial. Zum Beweis von M.2) überlegt man sich, dass $d_L(f, g) = 0$ impliziert, dass $d_n(f, g) = 0$ für alle $n \in \mathbb{N}$. Dann ist aber $f = g$. Andernfalls gäbe es einen Punkt $(u, t) \in U \times \mathbb{R}$ mit $f(u, t) \neq g(u, t)$. Dann gibt es aber auch eine Zahl $n \in \mathbb{N}$ mit $(u, t) \in W_n$ und $d_n(f, g) \neq 0$.

Zum Beweis der Dreiecksungleichung betrachten wir zunächst einen der Summanden, schreiben statt d_n einfach d und schätzen die Differenz

$$(2.2.11) \quad \frac{d(f, h)}{1 + d(f, h)} + \frac{d(h, g)}{1 + d(h, g)} - \frac{d(f, g)}{1 + d(f, g)}$$

ab. Nach Multiplikation mit den drei Nennern ergibt sich aus (2.2.11)

$$\begin{aligned}
 & d(f, h) + d(f, h)(d(h, g) + d(f, g)) + d(f, h)d(h, g)d(g, f) \\
 & + d(g, h) + d(g, h)(d(h, f) + d(f, g)) + d(f, h)d(h, g)d(g, f) \\
 & - (d(f, g) + d(f, g)(d(h, g) + d(f, h)) + d(f, h)d(h, g)d(g, f)) \\
 = & d(f, h) + d(g, h) - d(f, g) + 2d(f, h)d(h, g) + d(f, h)d(f, g)d(g, h) \\
 \geq & 0.
 \end{aligned}$$

Alternativ lässt sich die Dreiecksungleichung auch beweisen, indem wir feststellen, dass die Funktion $x \mapsto \frac{1}{1+1/x} = \frac{x}{1+x}$ monoton steigend ist und dass daher gilt

$$\begin{aligned}
 \frac{d(f, g)}{1 + d(f, g)} & \leq \frac{d(f, h) + d(h, g)}{1 + d(f, h) + d(h, g)} \\
 & = \frac{d(f, h)}{1 + d(f, h) + d(h, g)} + \frac{d(h, g)}{1 + d(f, h) + d(h, g)} \\
 & \leq \frac{d(f, h)}{1 + d(f, h)} + \frac{d(h, g)}{1 + d(h, g)}.
 \end{aligned}$$

Die vierte Aussage ist eine Übungsaufgabe (Aufgabe 2.5.2). Multiplizieren und Aufsummieren ändern natürlich nichts an der Eigenschaft einer Metrik.

Die letzte Behauptung folgt aus der vorherigen Aussage. \square

Satz 2.2.12 (Stetige Abhängigkeit von Anfangsdaten im \mathbb{R}^n) Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ eine offene Teilmenge, $I \subset \mathbb{R}$ ein offenes Intervall, $f : U \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine stetige, bezüglich der ersten Variablen lokal Lipschitz-stetige Abbildung, und $t_0 \in I$. Dann gilt: Die Lösung $u(t, t_0, u_0, f)$ des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$ ist in allen Variablen stetig.

Bemerkung 2.2.13 In Wirklichkeit beweisen wir etwas mehr. Wenn wir die Existenzaussage des Satzes von Peano zugrunde legen würden, würden wir sogar die stetige Abhängigkeit von $f \in C(U \times I, \mathbb{R}^n)$ erhalten. Es wäre natürlich, die Stetigkeit auf den parameterabhängigen Fixpunktsatz 1.4.14 von Banach zurückzuführen. Doch dabei treten Probleme auf. Deshalb geben wir hier einen direkten Beweis, ohne auf diese Version des Fixpunktsatzes zurückzugreifen.

Beweis. Setze $\mathbf{Y} = U \times \mathbb{R} \times \text{Lip}(U \times I, \mathbb{R}^n)$. Als Metrik d' auf \mathbf{Y} setzen wir

$$d'(y_1, y_2) = |u_1 - u_2| + |t_1 - t_2| + d_L(f_1, f_2),$$

wobei $y_k = (u_k, t_k, f_k)$ für $k = 1, 2$ bezeichnet. Ist $u(t)$ Lösung von $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$ so hat u die Form

$$u(t) = u_0 + \int_{t_0}^t f(u(s), s) ds.$$

Ist v die Lösung von

$$\dot{v} = g(v, t) \text{ und } v(\tau_0) = v_0,$$

so hat man natürlich die entsprechende Formel

$$v(t) = v_0 + \int_{\tau_0}^t g(v(s), s) ds.$$

Wir werden zeigen, dass zu jedem $t \in (t_1, t_2)$, dem maximalen Existenzintervall der Lösung u des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$ und zu jedem $\varepsilon > 0$ eine Zahl $\delta' > 0$ existiert, so dass

$$(2.2.14) \quad d'((u_0, t_0, f), (v_0, \tau_0, g)) < \delta'$$

impliziert, dass $[t_0, t]$ (oder $[t, t_0]$) im maximalen Existenzintervall der Lösung v von $\dot{v} = g(v)$, $v(\tau_0) = v_0$ liegt und für alle $s \in [t_0, t]$ (oder für alle $s \in [t, t_0]$) gilt

$$|u(s) - v(s)| < \varepsilon.$$

Wir wollen beides in einem Schritt zeigen. Seien also $t \in (t_1, t_2)$ und $\varepsilon > 0$ gegeben. O.B.d.A. nehmen wir an, dass $t > t_0$ ist. W sei eine Umgebung von $G = \{(u(s), s) \mid s \in [t_0, t]\}$ in $U \times I$, deren Abschluss kompakt ist und so dass f auf W eine Lipschitz Konstante M_W besitzt. Wir definieren $N = \sup\{|f(u, s)| \mid (u, s) \in W\} + 1$, $M = \max\{1, M_U\}$, $\Delta = \text{dist}(G, \partial W)$ und $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon e^{-M(t-t_0)}$. Ersetzen wir ε durch $\min\{\varepsilon, \Delta\}$ und zeigen wir, dass für ein $\delta' > 0$ aus (2.2.14) folgt, dass

$$|u(s) - v(s)| < \varepsilon, \quad \forall s \in [t_0, t],$$

so folgt natürlich insbesondere auch die Aussage über das maximale Existenzintervall. Es gibt ein $\varepsilon' > 0$, so dass aus $d_L(f, g) < \varepsilon'$ folgt, dass $|g(u, s)| < N$ für alle $(u, s) \in U$ ist. Wegen der Kompaktheit des Abschlusses von W gibt es ein n_0 , so dass $W \subset W_{n_0}$ ist. Da \overline{W} kompakt und $\cup_{n=0}^{\infty} W_n$ eine Überdeckung von \overline{W} ist, kann man eine endliche Teilüberdeckung auswählen. Da die Folge der $\{W_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ aufsteigend ist (siehe Punkt 2 der Konstruktion der Familie $\{W_n\}_{n \in \mathbb{N}}$), genügt dann eine einzelne Menge zum Überdecken. Wir setzen $\delta = \frac{\Delta}{3N}$. Dann gilt die Teilbehauptung: Ist $d_L(f, g) < \varepsilon'$ und $\text{dist}((v_0, \tau_0), G) < \delta$, so existiert die Lösung v des Anfangswertproblems $\dot{v} = g(v, t)$, $v(\tau_0) = v_0$ zumindest auf dem Intervall $[\tau_0 - \delta, \tau_0 + \delta]$. Diese Behauptung folgt aus dem Lemma 2.1.20, wenn wir zeigen, dass für $\tau \in [\tau_0 - \delta, \tau_0 + \delta]$, die Integralkurve $(v(\tau), \tau)$ in U verläuft. Dazu berechnen wir den Abstand von $(v(\tau), \tau)$ von G

$$\begin{aligned} \text{dist}(G, (v(\tau), \tau)) &\leq \text{dist}(G, (v_0, \tau_0)) + |(v_0, \tau_0) - (v(\tau), \tau)| < \delta + \int_{\tau_0}^{\tau} |g(v(s), s)| ds + |\tau - \tau_0| \\ &\leq \delta + \delta N + \delta \leq 3N\delta \leq \Delta. \end{aligned}$$

Wir setzen

$$\delta' = \min\left\{2^{-n_0-1}, 2^{-n_0-2} \frac{\tilde{\varepsilon}}{|t-t_0|}, \frac{\tilde{\varepsilon}}{4N}, \varepsilon', \delta\right\}$$

und zeigen, ist $d'((u_0, t_0, f), (v_0, \tau_0, g)) < \delta'$, so existiert die Lösung $v(s)$ für $s \in [t_0, t]$ und es gilt $|u(s) - v(s)| < \varepsilon$.

Zunächst folgern wir aus der Zwischenbehauptung, dass die Lösung v bei t_0 definiert ist, da $d_L(f, g) < \varepsilon'$ und $|t_0 - \tau_0| < \delta$ ist. Für die Differenz $|u_0 - v(t_0)|$ ergibt sich:

$$(2.2.15) \quad |u_0 - v(t_0)| \leq |u_0 - v_0| + \int_{\tau_0}^{t_0} |g(v(s), s)| ds < \delta' + N\delta' \leq 2N\delta' \leq \frac{\tilde{\varepsilon}}{2}.$$

Da sowohl u , wie auch v in t stetig sind, ist das maximale Intervall $I_{\max} \subset [t_0, t]$ mit den Eigenschaften

- $t_0 \in I_{\max}$
- $|u(t) - v(t)| < \varepsilon$

offen in $[t_0, t]$. Im nächsten Schritt beweisen wir, dass die Implikation

$$[t_0, \tau) \subset I_{\max} \Rightarrow [t_0, \tau] \subset I_{\max}$$

wahr ist. Ist nämlich $[t_0, \tau) \subset I_{\max}$ so dürfen wir schreiben

$$u(\tau) - v(\tau) = u_0 - v(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} f(u(s), s) ds - \int_{t_0}^{\tau} g(v(s), s) ds.$$

Für die Beträge ergibt sich

$$|u(\tau) - v(\tau)| \leq |u_0 - v(t_0)| + \left| \int_{t_0}^{\tau} f(u(s), s) ds - \int_{t_0}^{\tau} g(v(s), s) ds \right|.$$

Wir benutzen die Abschätzung bei t_0 und erhalten

$$|u(\tau) - v(\tau)| < \frac{\tilde{\varepsilon}}{2} + \left| \int_{t_0}^{\tau} (f(u(s), s) - g(v(s), s)) ds \right|.$$

Einfügen eines weiteren Termes und eine Anwendung der Dreiecksungleichung liefern:

$$|u(\tau) - v(\tau)| < \frac{\tilde{\varepsilon}}{2} + \int_{t_0}^{\tau} |f(u(s), s) - f(v(s), s)| ds + \int_{t_0}^{\tau} |f(v(s), s) - g(v(s), s)| ds.$$

Wir formen um (da $(v(s), s) \in U \forall s \in [t_0, \tau)$ ist dies möglich)

$$(2.2.16) \quad \begin{aligned} |u(\tau) - v(\tau)| &< \frac{\tilde{\varepsilon}}{2} + \int_{t_0}^{\tau} M |u(s) - v(s)| ds + \int_{t_0}^{\tau} d_{n_0}(f, g) ds \\ &\leq \frac{\tilde{\varepsilon}}{2} + \int_{t_0}^{\tau} M |u(s) - v(s)| ds + (t - t_0) d_{n_0}(f, g). \end{aligned}$$

Zunächst schätzen wir $d_{n_0}(f, g)$ ab. Da $d_L(f, g) < \delta'$ ist, hat man insbesondere $d_L(f, g) < 2^{-n_0-1}$. Da

$$2^{-n_0} \frac{d_{n_0}(f, g)}{1 + d_{n_0}(f, g)} \leq d_L(f, g)$$

ist, gilt

$$\frac{d_{n_0}(f, g)}{1 + d_{n_0}(f, g)} \leq 2^{n_0} d_L(f, g)$$

und daraus folgt

$$d_{n_0}(f, g)(1 - 2^{n_0} d_L(f, g)) \leq 2^{n_0} d_L(f, g).$$

Wegen der erwähnten Abschätzung für $d_L(f, g)$ ist der Faktor auf der linken Seite immer größer als $1/2$ und man erhält $d_{n_0}(f, g) < 2^{n_0+1} d_L(f, g)$. Also hat man die Abschätzung $d_{n_0}(f, g) \leq \frac{\tilde{\varepsilon}}{2|t-t_0|}$. Eingesetzt in (2.2.16) ergibt dies

$$|u(\tau) - v(\tau)| < \tilde{\varepsilon} + \int_{t_0}^{\tau} M|u(s) - v(s)| ds.$$

Wir benutzen Gronwalls Lemma und erhalten

$$|u(\tau) - v(\tau)| < \tilde{\varepsilon} e^{M(\tau-t_0)} \leq \varepsilon.$$

□

Bemerkung 2.2.17 Wir kommen zurück zu einer Fragestellung, die bereits ganz am Anfang aufgetaucht ist: Wir haben bei der Behandlung des mathematischen Pendels die rechte Seite durch die Linearisierung ersetzt. An dieser Stelle haben wir bemerkt, dass der Zusammenhang zwischen den Lösungen beider Gleichungen nicht sofort erkennbar ist. Stetige Abhängigkeit hilft hier weiter: wählen wir ein Gebiet, das eine hinreichend kleine Umgebung von (t_0, u_0) ist, so kann man den Unterschied zwischen u und $\sin(u)$ klein machen. Dann ist auf jedem kompakten Zeitintervall die Lösung in allen Variablen stetig, insbesondere wird der Unterschied zwischen der ursprünglichen Gleichung und der linearisierten Gleichung klein. (Führen Sie das Argument aus!)

Der nächste Schritt besteht darin, eine differenzierbare Abhängigkeit von Anfangswert, Anfangszeit und Parametern zu beweisen. Dazu zunächst eine einfache Konsequenz des gerade bewiesenen Satzes.

Korollar 2.2.18 (Stetige Abhängigkeit von Parametern) Sei (Λ, d_Λ) ein metrischer Raum, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen und $f : U \times \mathbb{R} \times \Lambda \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig und für festes $(t, \lambda) \in \mathbb{R} \times \Lambda$ bezüglich u lokal Lipschitz-stetig. Dann ist $u(t, t_0, u_0, \lambda)$ in allen Variablen stetig.

Beweis. Wir setzen $f^\lambda(u, t) = f(u, t, \lambda)$ und müssen zeigen, dass die Abbildung $\lambda \mapsto f^\lambda$ stetig (bezüglich der Metrik d_L) ist. Seien $\varepsilon > 0$ und $\lambda_0 \in \Lambda$ gegeben. Wir wählen $n_0 \in \mathbb{N}$, so dass

$$(2.2.19) \quad \sum_{n=n_0+1}^{\infty} 2^{-n} < \frac{\varepsilon}{2}$$

ist. Sei U_{n_0} das entsprechende Element aus der Familie von Mengen, welche zur Konstruktion von d_L herangezogen wurde. Dann existiert ein $\delta > 0$, so dass

$$d_\Lambda(\lambda_0, \lambda) < \delta \Rightarrow d_{n_0}(f^\lambda, f^{\lambda_0}) < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Wenn dies gezeigt ist, ist der Rest klar. Denn dann ist für $n \leq n_0$ auch $d_n(f^\lambda, f^{\lambda_0}) < \varepsilon/2$ und daher ist

$$(2.2.20) \quad \sum_{n=1}^{n_0} 2^{-n} \frac{d_n(f^\lambda, f^{\lambda_0})}{1 + d_n(f^\lambda, f^{\lambda_0})} < \frac{\varepsilon}{2}$$

und aus (2.2.19), (2.2.20) folgt, dass $d_L(f^\lambda, f^{\lambda_0}) < \varepsilon$. Bleibt noch die Existenz von δ zu beweisen. Zu jedem $(u_0, t_0) \in U_{n_0+1}$ gibt es eine Umgebung $Z(u_0, t_0, \lambda_0) \subset U \times I \times \Lambda$, so dass $|f(u, t, \lambda) - f(u_0, t_0, \lambda_0)| < \varepsilon/2$ ist. Dies liegt an der Stetigkeit von f in allen Variablen. Natürlich enthält $Z(u_0, t_0, \lambda_0)$ eine Menge der Form $U'(u_0, t_0) \times Y_{\delta(u_0, t_0)}$, wobei $U'(u_0, t_0) \subset U_{n_0+1}$ eine Umgebung von (u_0, t_0) ist und

$$Y_{\delta(u, t)} = \{\lambda \in \Lambda \mid d_\Lambda(\lambda, \lambda_0) < \delta(u, t)\}$$

ist. Da \overline{W}_{n_0} kompakt ist, überdecken endlich viele Mengen der Form $W'(u_k, t_k)$, $k = 1, \dots, K$ die Menge U_{n_0} . Sei $\delta = \min\{\delta(u_k, t_k) \mid 1 \leq k \leq K\}$. Dieses δ hat offensichtlich die gewünschten Eigenschaften. \square

Als Folgerung hieraus betrachten wir nun differenzierbare Abhängigkeiten. Dazu schränken wir uns auf den Fall ein, dass Λ eine offene Teilmenge des \mathbb{R}^m für ein $m \in \mathbb{N}$ ist. d_Λ ist dann natürlich die übliche Metrik. Zur Motivation betrachten wir das folgende Beispiel.

Beispiel 2.2.21 Sei $f : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben durch $f(u, \lambda) = \lambda u$. Dann ist für jedes $\lambda \in \mathbb{R}$ die Lösung des Anfangswertproblems $\dot{u} = \lambda u$, $u(0) = 1$ gegeben durch $u(t, 0, 1, \lambda) = e^{\lambda t}$. Diese Lösung ist nach λ differenzierbar und es gilt

$$\frac{\partial u(t, 0, 1, \lambda)}{\partial \lambda} = t e^{\lambda t}.$$

Sei u_λ diese Funktion, dann erfüllt u_λ die Anfangsbedingung $u_\lambda(0) = 1$ und genügt der Differentialgleichung (hier ist $f_\lambda = \frac{\partial f}{\partial \lambda}$ und $f_u = \frac{\partial f}{\partial u}$)

$$\dot{u}_\lambda = u + \lambda u_\lambda (= f_\lambda + f_u u_\lambda).$$

Die auf diese Weise vermutete Formel kann man auch noch durch eine formale Betrachtung von Differentialquotienten motivieren. Dazu sei $f : W \times \mathbb{R} \times \Lambda \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Lipschitz-stetige Abbildung, wobei $\Lambda \subset \mathbb{R}^m$ eine offene Teilmenge ist. Sei λ_i eine der Variablen in \mathbb{R}^m . Die Abbildung f hat in Koordinaten die Form $f = (f^1, \dots, f^n)$. Mit $f_{\lambda_i}^j$ bezeichnen wir die partielle Ableitung, also

$$f_{\lambda_i}^j = \frac{\partial f^j}{\partial \lambda_i}, \quad j = 1, \dots, n, \quad i \in \{1, \dots, m\}.$$

Wir schreiben f_{λ_i} für die Abbildung

$$f_{\lambda_i} = (f_{\lambda_i}^1, \dots, f_{\lambda_i}^n).$$

Für die Vorbetrachtung reicht es, sich auf den Fall $\lambda \in \mathbb{R}$ zu beschränken. Wir wollen uns damit die nachfolgenden Ergebnisse plausibel machen. Nun seien $u(t, t_0, u_0, \lambda_1)$ bzw. $u(t, t_0, u_0, \lambda_2)$ Lösungen des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$ für zwei verschiedene Werte des Parameters $\lambda_{1,2} \in \mathbb{R}$. Weiter schreiben wir $u_{\lambda}(t, t_0, u_0, \lambda_i)$ für die Ableitung von $u(t, t_0, u_0, \lambda)$ nach λ im Punkt $\lambda = \lambda_i$. Für die Differenz der beiden Funktionen ergibt sich

$$\begin{aligned} \dot{u}(t, t_0, u_0, \lambda_1) - \dot{u}(t, t_0, u_0, \lambda_2) &= f(u(t, t_0, u_0, \lambda_1), t, \lambda_1) - f(u(t, t_0, u_0, \lambda_2), t, \lambda_2) \\ &= f(u(t, t_0, u_0, \lambda_1), t, \lambda_1) - f(u(t, t_0, u_0, \lambda_2), t, \lambda_1) \\ &\quad + f(u(t, t_0, u_0, \lambda_2), t, \lambda_1) - f(u(t, t_0, u_0, \lambda_2), t, \lambda_2). \end{aligned}$$

Wir schreiben nun $u(1)$ für $u(t, t_0, u_0, \lambda_1)$ und entsprechend auch $u(2)$ für $u(t, t_0, u_0, \lambda_2)$. Dividiert man durch $(\lambda_1 - \lambda_2)$, so ergibt sich aus dem obigen

$$\begin{array}{ccc} \frac{\dot{u}(1) - \dot{u}(2)}{\lambda_1 - \lambda_2} &= \frac{f(u(1), t, \lambda_1) - f(u(2), t, \lambda_1)}{u(1) - u(2)} \frac{u(1) - u(2)}{\lambda_1 - \lambda_2} + \frac{f(u(2), t, \lambda_1) - f(u(2), t, \lambda_2)}{\lambda_1 - \lambda_2} & \lambda_2 \rightarrow \lambda_1. \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \dot{u}_{\lambda}(1) & f_u(u(1), t, \lambda_1) u_{\lambda}(1) & f_{\lambda}(u(1), t, \lambda_1) \end{array}$$

Man sieht, dass es einiger Überlegungen bedarf um die Vertauschung der entsprechenden Grenzprozesse zu rechtfertigen. Ähnliche Überlegungen kann man für die Ableitungen nach Anfangswert und Anfangszeit anstellen.

Statt den Grenzübergang für Differentialquotienten zu rechtfertigen, werden wir Differentialgleichungen herleiten, die von den Ableitungen nach der verschiedenen Variablen erfüllt werden. Existenz- und Eindeutigkeitsätze erlauben uns dann zu schließen, dass die Ableitungen existieren. Zur Herleitung dieser Differentialgleichungen dient ein Hilfssatz. Wir wollen noch folgende Bezeichnung vereinbaren. Seien V_1, V_2 endlichdimensionale Vektorräume. Dann bezeichne $\mathcal{L}(V_1, V_2)$ die Menge aller linearen Abbildungen von V_1 nach V_2 . Ist $V_1 = V_2$ so sei $\mathbb{1}$ die Identität.

Hilfssatz 2.2.22 Sei $A : I \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ eine stetige Abbildung eines reellen Intervalls I in den Raum der linearen Abbildungen des \mathbb{R}^n in sich. Dann hat das Anfangswertproblem, wobei eine Funktion $C : I \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ gesucht wird,

$$(2.2.23) \quad \dot{C} = AC, \quad C(t_0) = \mathbb{1}$$

eine eindeutig bestimmte Lösung. Hängt A stetig von Parametern λ in einem metrischen Raum Λ ab, so ist $C(t, \lambda)$ in beiden Variablen stetig.

Beweis. Wir betrachten die folgenden n Anfangswertprobleme für Funktionen $c_i : I \rightarrow \mathbb{R}^n$, $i = 1, \dots, n$ gegeben durch

$$\dot{c}_i = Ac_i, \quad c_i(t_0) = e_i,$$

wobei e_i der i -te kanonische Einheitsvektor ist. Diese Gleichung hat für alle $i \in \{1, \dots, n\}$ eine Lösung, welche auf I existiert. Dann ist aber

$$C = (c_1, \dots, c_n)$$

eine Lösung von (2.2.23). □

Definition 2.2.24 Sei $u(t, t_0, u_0)$ eine Lösung des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$. Die Differentialgleichung für eine Funktion $v : I \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ gegeben durch

$$\dot{v} = D_u f(u(t, t_0, u_0), t)v$$

heißt **Variationsgleichung** für u . Entsprechendes definiert man auch für parameterabhängiges f .

Bemerkung 2.2.25 Aus dem Hilfssatz 2.2.22 folgt die Lösbarkeit der Variationsgleichung.

Bemerkung 2.2.26 Mit $D_i u$ wird die Ableitung von $u(t, t_0, u_0, \lambda)$ nach der i -ten Variablen bezeichnet.

Satz 2.2.27 (Differenzierbare Abhängigkeit) Seien $U \subset \mathbb{R}^n$, $\Lambda \subset \mathbb{R}^m$ offen, $f : U \times \mathbb{R} \times \Lambda \rightarrow \mathbb{R}^n$ sei k -mal stetig differenzierbar. Dann ist die Lösung $u(t, t_0, u_0, \lambda)$ des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$ nach allen Variablen k -mal stetig differenzierbar. Die ersten Ableitungen von u genügen den im folgenden beschriebenen Differentialgleichungen:

1. Die Ableitung von $u(t, t_0, u_0, \lambda)$ nach der Anfangszeit, die wir, unserer Konvention folgend, mit $D_2 u$ bezeichnen wollen, löst die Gleichung

$$\dot{z} = \frac{\partial f(u(t), t, \lambda)}{\partial u} z,$$

für eine Abbildung $z : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}, \mathbb{R}^n)$ mit Anfangswert $z(t_0) = -f(u_0, t_0, \lambda)$.

2. Die Ableitung $D_3 u$ nach dem Anfangswert ist eine lineare Abbildung $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ und löst die Gleichung

$$\dot{C} = \frac{\partial f(u(t), t, \lambda)}{\partial u} C,$$

mit Anfangsbedingung $C(t_0) = \mathbb{1}$.

3. Die Ableitung nach dem Parameter $D_4 u$ ist eine Abbildung in $\mathcal{L}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ und löst die Gleichung

$$\frac{\partial}{\partial t} B = \frac{\partial f(u(t), t, \lambda)}{\partial u} B + f_\lambda(u, t, \lambda).$$

mit Anfangswert $B(t_0) = 0$.

Beweis. Wir beweisen dies durch Induktion nach k . Haben wir die obigen Formeln bewiesen, dann folgt zunächst die einmalige Differenzierbarkeit. Aber diese Abbildungen sind dann nach dem gleichen Schritt wieder differenzierbar. Sei $u(t, t_0, u_0, \lambda)$ die Lösung des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u, t)$, $u(t_0) = u_0$. Wir betrachten die Ableitungen nach u_0 und nach λ zusammen. Dazu erweitern wir künstlich das Anfangswertproblem zu

$$(2.2.28) \quad \begin{aligned} \dot{u} &= f(u, t, \lambda), & u(t_0) &= u_0 \\ \dot{\lambda} &= 0, & \lambda(t_0) &= \lambda. \end{aligned}$$

Natürlich sind die Lösungen des neuen Systems nichts anderes als die Lösungen des alten Systems, nur, dass die Parameter als Anfangswerte auftreten. Sei

$$w = \begin{pmatrix} u \\ \lambda \end{pmatrix}$$

und damit

$$(2.2.29) \quad \dot{w} = F(w, t), \quad w_0 = \begin{pmatrix} u_0 \\ \lambda \end{pmatrix}$$

mit der offensichtlichen Identifikation

$$F(w, t) = \begin{pmatrix} f(u, t, \lambda) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Differenzierbarkeit nach dem Anfangswert für die neue Gleichung bedeutet natürlich, dass die Lösung der ursprünglichen Gleichung sowohl nach dem Anfangswert, wie auch nach den Parametern differenzierbar ist. Sei $w(t, t_0, w_0)$ die Lösung der Gleichung (2.2.29). Wir setzen für $h \in \mathbb{R}^{n+m}$

$$v(t, t_0, w_0, h) = w(t, t_0, w_0 + h) - w(t, t_0, w_0)$$

und

$$V(t, t_0, w_0, h) = \int_0^1 D_w F(w(t, t_0, w_0) + sv(t, t_0, w_0, h), t) ds.$$

Dann gilt

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{\partial w}{\partial t}(t, t_0, w_0 + h) - \frac{\partial w}{\partial t}(t, t_0, w_0) \\ &= F(w(t, t_0, w_0 + h), t) - F(w(t, t_0, w_0), t) \\ &= V(t, t_0, w_0, h)v(t, t_0, w_0, h) \end{aligned}$$

Da $v(t_0, t_0, w_0, h) = w_0 + h - w_0 = h$ ist, löst v das Anfangswertproblem

$$\dot{z} = V(t, t_0, w_0, h)z, \quad z(t_0) = h.$$

Nach Hilfssatz 2.2.22 hat das Anfangswertproblem

$$\dot{C} = VC, \quad C(t_0) = \mathbb{1}$$

eine eindeutig bestimmte Lösung $C(t, t_0, w_0, h)$, die nach Hilfssatz 2.2.22 und Korollar 2.2.18 in allen Variablen stetig ist. Aus der Eindeutigkeit wiederum schließt man, dass v die Form

$$v(t, t_0, w_0, h) = C(t, t_0, w_0, h)h$$

hat. Dann ergibt sich

$$\begin{aligned} |w(t, t_0, w_0 + h) - w(t, t_0, w_0) - C(t, t_0, w_0, 0)h| &\leq |v(t, t_0, w_0, h) - C(t, t_0, w_0, 0)h| \\ &= |C(t, t_0, w_0, h)h - C(t, t_0, w_0, 0)h| \\ &\leq |C(t, t_0, w_0, h) - C(t, t_0, w_0, 0)||h| \\ &= o(|h|). \end{aligned}$$

Man beachte, dass die erste Norm in der letzten Ungleichung eine Norm im Raum der linearen Abbildungen von \mathbb{R}^{n+m} in sich ist. Diese wird wegen der Stetigkeit von C in allen Variablen klein. Aus diesen Überlegungen folgt, dass w nach dem Anfangswert w_0 differenzierbar ist, mit Ableitung $C(t, t_0, w_0, 0)$. Damit haben wir Differenzierbarkeit von u nach Anfangswert und Parameter geklärt. Wir kommen zur Ableitung nach der Anfangszeit. Für den Rest des Beweises unterdrücken wir bei der Lösung u die Abhängigkeit vom Parameter, um die Schreibweise nicht unnötig zu verkomplizieren. Im folgenden sei $h \in \mathbb{R}$. Setzt man

$$v(t, t_0, u_0, h) = u(t, t_0 + h, u_0) - u(t, t_0, u_0)$$

und

$$A(t, t_0, u_0, h) = \int_0^1 f_u(u(t, t_0, u_0) + sv(t, t_0, u_0, h), t) ds,$$

so erhält man für v die Darstellung

$$\begin{aligned} v(t_0, t_0, u_0, h) &= u(t_0, t_0 + h, u_0) - u(t_0, t_0, u_0) \\ &= u(t_0, t_0 + h, u_0) - u(t_0 + h, t_0 + h, u_0) + u(t_0 + h, t_0 + h, u_0) - u_0 \\ &= -(u(t_0 + h, t_0 + h, u_0) - u(t_0, t_0 + h, u_0)) \\ &= -h \int_0^1 \frac{\partial u}{\partial t}(t_0 + sh, t_0 + h, u_0) ds \\ &= -h \int_0^1 f(u(t_0 + sh, t_0 + h, u_0), t_0 + sh) ds \\ &= -hf(u_0, t_0) + R(t_0, u_0, h)h, \end{aligned}$$

wobei natürlich gilt

$$R(t_0, u_0, h) = \int_0^1 (f(u_0, t_0) - f(u(t_0 + sh, t_0 + h, u_0), t_0 + sh)) ds.$$

Die Funktion v löst wieder ein Anfangswertproblem, nämlich

$$\dot{z} = A(t, t_0, u_0, h)z, \quad z(t_0) = -hf(u_0, t_0) + R(t_0, u_0, h)h.$$

Man beachte, dass A eine lineare Abbildung des \mathbb{R}^n in sich ist. Also können wir mit dem Hilfssatz 2.2.22 das Anfangswertproblem

$$\dot{C} = AC, \quad C(t_0) = \mathbb{1}$$

mit einer matrixwertigen Funktion $C = C(t, t_0, u_0, h)$ lösen. Wiederum ist C in allen Variablen stetig. Aus der Eindeutigkeit folgt wie oben die Darstellung von v durch

$$v(t, t_0, u_0, h) = C(t, t_0, u_0, h) (-hf(u_0, t_0) + hR(t_0, u_0, h)).$$

Auch das weitere ist dem obigen ganz ähnlich. Man erhält

$$\begin{aligned} & u(t, t_0 + h, u_0) - u(t, t_0, u_0) + C(t, t_0, u_0, 0)f(u_0, t_0)h \\ &= ((C(t, t_0, u_0, 0) - C(t, t_0, u_0, h))f(u_0, t_0) + C(t, t_0, u_0, h)R(t_0, u_0, h))h \\ &= o(|h|). \end{aligned}$$

Damit ist u stetig nach t_0 differenzierbar und $D_2u(t, t_0, u_0) = -C(t, t_0, u_0, 0)f(u_0, t_0)$. Hieraus folgt die Behauptung. \square

2.3 Differentialgleichungen höherer Ordnung

In diesem kurzen Abschnitt wollen wir eine Verbindung zwischen Differentialgleichungen höherer Ordnung in \mathbb{R} und Gleichungen erster Ordnung im \mathbb{R}^n herstellen. Damit übertragen sich die Existenzsätze für die Lösungen von nichtautonomen Gleichungen auch auf Gleichungen höherer Ordnung. Wir bezeichnen die n -te Ableitung einer Funktion $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $u^{(n)}$. In diesem Abschnitt sei die unabhängige Veränderliche x . Gegeben seien $n - 1$ stetige Funktionen $a_i : I \rightarrow \mathbb{R}$, wobei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall ist, und eine lokal Lipschitz-stetige Funktion $f : \mathbb{R}^n \times I \rightarrow \mathbb{R}$. Wir suchen nun eine Funktion $u : I \rightarrow \mathbb{R}$, welche der Gleichung

$$(2.3.1) \quad Lu = u^{(n)} + a_1(x)u^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}(x)u' + a_n(x)u = f(u, u', \dots, u^{(n-1)}, x)$$

genügt. Bevor wir uns über Anfangsbedingungen Gedanken machen, schreiben wir die Gleichung um. Wir setzen $y_i = u^{(i-1)}$. Daraus erhält man dann das System

$$\begin{aligned} y_1' &= y_2 \\ y_2' &= y_3 \\ &\vdots \\ y_{n-1}' &= y_n \\ y_n' &= -(a_1(x)u^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}(x)u' + a_n(x)u) + f(y, x). \end{aligned}$$

Setzt man in die letzte Gleichung noch die neuen Variablen ein, so hat man

$$y'_n = -(a_1(x)y_n + \cdots + a_{n-1}(x)y_2 + a_n(x)y_1) + f(y, x).$$

Dieses System hat die Form

$$y' = A(x)y + F(y, x)$$

mit

$$(2.3.2) \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

$$(2.3.3) \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & \dots & \dots & -a_1 \end{pmatrix}$$

und

$$(2.3.4) \quad F(y, x) = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ f(y, x) \end{pmatrix}.$$

Um hieraus ein Anfangswertproblem zu machen, müssen wir noch Anfangswerte für y vorgeben, also $y(t_0) = y_0$. Solche Anfangswerte übersetzen sich in Anfangswerte für u und die ersten $n - 1$ Ableitungen von u . Damit überträgt sich der Existenz und Eindeigkeitssatz auf solche Gleichungen. Wir notieren:

Satz 2.3.5 *Es seien $u_0^{(k)}$ für $k = 0, \dots, n - 1$ reelle Zahlen, $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall und $a_i : I \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, n - 1$ seien stetige Funktionen. Die Abbildung $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ sei stetig und bezüglich der ersten Variablen lokal Lipschitz-stetig. Dann hat das Anfangswertproblem (vgl. (2.3.1))*

$$Lu = f(u, u', \dots, u^{(n-1)}, x), \quad u^{(k)}(x_0) = u_0^{(k)} \quad k = 0, \dots, n - 1, x_0 \in I$$

eine eindeutig bestimmte Lösung, die auf einem Intervall $J \subset I$ definiert ist. Genügt f einer Lipschitz Bedingung mit einer globalen Lipschitz Konstante, so existiert die Lösung auf ganz I .

Beweis. Folgt sofort aus den entsprechenden Sätzen für die Anfangswertprobleme (2.1.2) und (2.1.3). \square

2.4 Ober- und Unterlösungen

Oberlösungen bzw. Unterlösungen dienen dazu die wahre Lösung einzugrenzen und zumindest noch Abschätzungen machen zu können. Sie sind für eine qualitative Diskussion oft äußerst nützlich, wie wir an Beispielen sehen werden. Wir beginnen mit einer einfachen Beobachtung.

Lemma 2.4.1 Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall der Form $I = [x_0, b)$, $b \leq \infty$ und $f, g : I \rightarrow \mathbb{R}$ seien stetige Funktionen, die im Inneren von I differenzierbar sind. Ist $f(x_0) < g(x_0)$ so ist entweder

- $f(x) < g(x)$ für alle $x \in I$

oder

- es gibt eine Stelle $x_1 \in I$ mit $f(x_1) = g(x_1)$ und $f'(x_1) \geq g'(x_1)$.

Beweis. Angenommen das Lemma wäre falsch. Seien f, g differenzierbare Funktionen für die die Aussage des Lemmas nicht gilt. Es gibt ein $\varepsilon > 0$ mit der Eigenschaft, dass $f < g$ auf dem Intervall $[x_0, x_0 + \varepsilon)$. Da wir annehmen, dass für f, g das Lemma nicht gilt, gibt es einen Punkt $y \in I$ mit $f(y) \geq g(y)$. Dann gibt es ein maximales Intervall $J \subset I$ mit $x_0 \in J$ und $f(x) < g(x)$ für alle $x \in J$. Am rechten Endpunkt x_1 von J hat man, dass $f(x_1) = g(x_1)$ ist. Wäre nun $f'(x_1) < g'(x_1)$, so wäre $f - g$ auf einem Intervall $(x_1 - \delta, x_1)$ positiv, im Widerspruch zur Wahl von x_1 . (Man führe dieses Argument aus!) \square

Definition 2.4.2 Gegeben sei ein Intervall $I \subset \mathbb{R}$ und das Anfangswertproblem

$$(2.4.3) \quad \dot{u} = f(u, t), u(t_0) = u_0,$$

wobei f eine Funktion $f : I \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ist. Eine Funktion $v : \mathbb{R} \rightarrow I$ heißt **Oberlösung** von (2.4.3), falls

- $v(t_0) \geq u_0$

und

- $\dot{v} > f(v, t)$ gilt.

Sind für eine Funktion w beide Ungleichungen gerade umgekehrt, so sprechen wir von einer **Unterlösung**.

Aufgrund unseres Lemmas 2.4.1 verlaufen Unterlösungen unterhalb und Oberlösungen oberhalb der wahren Lösung des Anfangswertproblems. Man erhält sie oft durch eine Veränderung von f , die eine explizite Lösung möglich macht. Wir diskutieren diese Möglichkeiten an einem Beispiel.

Beispiel 2.4.4 Gegeben sei das Anfangswertproblem $\dot{u} = u^2 + t^2 = f(u, t)$, $u(0) = 1$. Durch die Veränderung der rechten Seite f zu $g(u, t) = u^2$ erhält man das Anfangswertproblem $\dot{v} = v^2$ und $v(0) = 1$. Aufgrund des Lemmas ist v eine Unterlösung. Eine einfache Rechnung lehrt, dass $v(t, 0, 1)$ die Form

$$v(t, 0, 1) = \frac{1}{1-t}$$

hat. Das maximale Existenzintervall von v ist $(-\infty, 1)$ und daher kann auch die Lösung $u(t, 0, 1)$ höchstens bis zum Punkt $t = 1$ existieren. Bis dort gilt aber $t \leq 1$, also kann man abschätzen $f(u, t) \leq u^2 + 1$. Die Lösung des Anfangswertproblems $\dot{w} = 1 + w^2$, $w(0) = 1$ ist daher eine Oberlösung des Ausgangsproblems. $w(t, 0, 1)$ hat die Form

$$w(t) = \tan\left(t + \frac{\pi}{4}\right).$$

Also haben wir auf dem Existenzintervall von w und für $t \geq 0$

$$v(t, 0, 1) < u(t, 0, 1) < w(t, 0, 1).$$

Die Lösung w existiert bis $t^* = \frac{\pi}{4}$. Insbesondere ist auch $[0, \frac{\pi}{4})$ im maximalen Existenzintervall von u enthalten. Ein weiteres Beispiel wollen wir in den Übungen untersuchen.

2.5 Aufgaben

Aufgabe 2.5.1 Man vervollständige den Beweis von Satz 2.1.20.

Aufgabe 2.5.2 Man zeige, dass eine Folge $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ von Funktionen $f_n : W \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ genau dann in der Metrik d_L konvergiert, wenn die Folge $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ auf jeder kompakten Teilmenge $K \subset W \times \mathbb{R}$ gleichmäßig konvergiert.

Aufgabe 2.5.3 (a) Man löse das Anfangswertproblem $\dot{u} = \operatorname{sgn}(u)\sqrt{|u|}$, $u(0) = u_0$ für jedes $u_0 \in \mathbb{R}$. Sind die Lösungen eindeutig?

(b) Existieren die Lösungen des Anfangswertproblems $\dot{u} = u^2$, $u(0) = u_0$ für jedes $u_0 \in \mathbb{R}$ für alle $t \in \mathbb{R}$.

Aufgabe 2.5.4 Man zeige, dass die Lösungen des Anfangswertproblems $p(x)u'' + q(x)u' + c(x)u = 0$ und $u(x_0) = a$, $u'(x_0) = b$ eindeutig auf dem Intervall $I = [x_0 - \delta, x_0 + \delta]$ lösbar sind, sofern p , q , c auf dem Intervall I stetig sind und p dort nicht verschwindet. Wie ist es, wenn p auf dem Rand verschwindet?

Kapitel 3

Lineare Differentialgleichungen

3.1 Die Jordan-Normalform

In diesem kurzen Abschnitt wiederholen wir einige Begriffe der linearen Algebra. Sei $A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine lineare Abbildung mit zugehöriger Matrix A (diese wird durch die Wahl einer Basis bestimmt). Wir gehen immer von der kanonischen Basis aus und identifizieren auf diese Weise die lineare Abbildung mit der Matrix. Eine Zahl $\lambda \in \mathbb{C}$ heißt *Eigenwert* von A , wenn es einen Vektor $u_c \in \mathbb{C}^n$ gibt mit

$$Au_c = \lambda u_c.$$

Dieser Vektor u_c wird *Eigenvektor* genannt. Natürlich müssen wir auch bei reellen Matrizen komplexe Eigenwerte und Eigenvektoren zulassen. Deshalb arbeiten wir zunächst im komplexifizierten Raum \mathbb{C}^n . Die Eigenwerte sind Lösungen der **charakteristischen Gleichung**

$$(3.1.1) \quad \det(A - \lambda \mathbb{1}) = 0.$$

Wegen des Fundamentalsatzes der Algebra gibt es (mit Vielfachheiten gerechnet) genau n Wurzeln dieser Gleichung. Jede Wurzel von (3.1.1) ist auch Eigenwert, jedoch gibt es im allgemeinen weniger als n Eigenvektoren. Sei λ ein Eigenwert, so ist

$$K_\lambda = \ker(A - \lambda \mathbb{1})$$

ein A -invarianter Unterraum, der **Eigenraum** von A zum Eigenwert λ . Sei m die Dimension von K_λ . K_λ ist enthalten im **verallgemeinerten Eigenraum**, der gegeben ist durch

$$E_\lambda = \{u \in \mathbb{C}^n \mid \exists k \in \mathbb{N} \text{ mit } (A - \lambda \mathbb{1})^k u = 0\}.$$

Der verallgemeinerte Eigenraum E_λ zum Eigenwert λ ist invariant unter der Abbildung A . Eine weitere Zerlegung in invariante Unterräume ist möglich. Dazu betrachtet man den minimalen Wert k_0 , so dass $\ker(A - \lambda \mathbb{1})^{k_0} = E_\lambda$ ist. So eine Zahl existiert

immer. In E_λ existiert eine Basis B , welche die Vereinigung von m Mengen H_1, \dots, H_m ist, wobei jedes H_k die Form

$$(3.1.2) \quad H_k = \{u_{k,1}, \dots, u_{k,r_k}\}$$

hat mit

$$(A - \lambda \mathbb{1})u_{k,i+1} = u_{k,i}, \quad i = 1, \dots, r_k, \quad (A - \lambda \mathbb{1})u_{k,1} = 0.$$

Die Einschränkung von A auf E_λ hat in der Basis B dann die Gestalt

$$(3.1.3) \quad \begin{pmatrix} \mathcal{B}_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \mathcal{B}_2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \mathcal{B}_m \end{pmatrix},$$

wobei jeder dieser $r_k \times r_k$ Blöcke \mathcal{B}_k die einfache Form

$$(3.1.4) \quad \mathcal{B}_k = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \lambda & 1 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \lambda & 1 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

hat. Damit haben wir die **komplexe Jordan¹-Normalform** einer Matrix erhalten. In der **reellen Jordan-Normalform** hat man auch eine Darstellung in Blöcken wie in (3.1.3), jedoch sehen die Blöcke i.a. anders aus. Ist λ reell so bleibt die Form (3.1.4) erhalten. Für komplexe Eigenwerte $\lambda = e^{i\alpha}$, ergibt sich statt (3.1.4) die Form

$$(3.1.5) \quad \mathcal{B}_k = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \ddots & 1 & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & \ddots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

¹Camille Marie Ennemond Jordan (5.1.1838-21.1.1922) wurde zunächst zum Bergbauingenieur ausgebildet. Im Jahre 1916 wurde er Präsident der französischen Akademie der Wissenschaften. Sein Werk umfaßt neben der Normalform Beiträge zur Algebra (u.a. zur Galois-Theorie), zur Analysis, zur Wahrscheinlichkeitsrechnung und zur Topologie der Ebene (Kurvensatz).

Eine einfache Begründung für diese Form ergibt sich aus der komplexen Jordanschen Normalform und der folgenden Überlegung. Ist $\lambda \in \mathbb{C}$ ein komplexer Eigenwert einer reellen Matrix so ist $\bar{\lambda}$ ebenso ein Eigenwert und es gibt zu dem zur Menge aus Gleichung 3.1.2 $H_k = \{u_{k,1}, \dots, u_{k,r_k}\}$ eine Menge $H_k^* = \{\bar{u}_{k,1}, \dots, \bar{u}_{k,r_k}\}$ konjugiert komplexer Vektoren die eine entsprechende Basis zum Eigenwert $\bar{\lambda}$ bilden. Wir definieren nun ein Paar reeller Vektoren

$$\begin{aligned} v_{k,j} &= \frac{1}{2}(u_{k,j} + \bar{u}_{k,j}), \quad j = 1, \dots, r_k \\ w_{k,j} &= \frac{1}{2i}(u_{k,j} - \bar{u}_{k,j}), \quad j = 1, \dots, r_k. \end{aligned}$$

Nun sehen wir leicht

$$\begin{aligned} Av_{k,j} &= \frac{1}{2}(Au_{k,j} + A\bar{u}_{k,j}) \\ &= v_{k,j-1} + \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{k,j} \\ w_{k,j} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Für $Aw_{k,j}$ ergibt eine ähnliche Rechnung ein ganz ähnliches Ergebnis. Für die Basis, die immer aus Paaren

$$H_k^{\mathbb{R}} = \{v_{k,1}, w_{k,1}, \dots, v_{k,r_k}, w_{k,r_k}\}$$

besteht, ergibt sich dann die obige Abbildungsmatrix.

Wie sieht der Block für $\lambda = |\lambda|e^{i\alpha}$ aus?

3.2 Die Matrix-Exponentialabbildung

Definition 3.2.1 Sei $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$. Wir setzen $\|A\| = \sup \{|Au| \mid u \in \mathbb{R}^n, |u| = 1\}$.

Lemma 3.2.2 $\|\cdot\|$ ist eine Norm auf dem linearen Raum der linearen Abbildungen von \mathbb{R}^n in sich. Außerdem gilt $\|AB\| \leq \|A\|\|B\|$.

Beweis. Einfaches Nachrechnen! □

Definition 3.2.3 Sei A eine $n \times n$ -Matrix. Die Funktion $E : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ sei definiert durch

$$(3.2.4) \quad E(A, t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{t^k}{k!} A^k.$$

Wir nennen $E(A, t)$ die **Matrixexponentialfunktion** und schreiben dafür auch

$$E(A, t) = e^{At}.$$

Lemma 3.2.5 Die Funktion $E(A, t)$ ist für jedes $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ und jede reelle Zahl $t \in \mathbb{R}$ definiert.

Beweis. Übungsaufgabe! □

Satz 3.2.6 Die Matrixexponentialfunktion $E(A, t)$ löst das Anfangswertproblem (2.2.23)

$$\dot{C} = AC, C(0) = \mathbb{1}$$

aus Hilfssatz 2.2.22.

Beweis. Zunächst betrachten wir eine Teilsumme der Reihe $E(A, t)$

$$E_m(A, t) = \sum_{k=0}^m \frac{t^k}{k!} A^k.$$

Die Ableitung von $E_m(A, t)$ ist natürlich

$$\dot{E}_m(A, t) = \sum_{k=1}^m \frac{t^{k-1}}{(k-1)!} A^k = AE_{m-1}(A, t).$$

Wegen der gleichmäßigen Konvergenz der rechten Seite (auf kompakten Teilmengen von \mathbb{R}) und der Beziehung $(E_m)' = (\dot{E})_m$ ist $E(A, t)$ differenzierbar und $\dot{E}(A, t) = AE(A, t)$. Natürlich ist auch $E(A, 0) = \mathbb{1}$. □

Die Lösung des Anfangswertproblems $\dot{u} = Au, u(0) = u_0$ erhält man also durch $u(t, u_0) = E(A, t)u_0$.

Definition 3.2.7 Wenn für die Matrizen A, B gilt, dass $AB = BA$, dann sagen wir, A **kommutiert** mit B . Auch: A und B **kommutieren** (miteinander).

Hilfssatz 3.2.8 Wenn die beiden Matrizen A, B kommutieren, d.h. wenn $AB = BA$, dann folgt für alle $t \in \mathbb{R}$

$$BE(A, t) = E(A, t)B,$$

und es gilt

$$E(A + B, t) = E(A, t)E(B, t) = E(B, t)E(A, t) \quad \forall t \in \mathbb{R}.$$

Beweis. Die erste Eigenschaft ist eine unmittelbare Konsequenz der Definition, die zweite erhält man aus dem Eindeigkeitssatz für die Lösung von Anfangswertproblemen, indem man nachprüft, dass $E(A + B, t)$ und $E(A, t)E(B, t)$ das gleiche Anfangswertproblem lösen. □

A kann durch eine Ähnlichkeitstransformation in die Jordan'sche Normalform gebracht werden. Sei J die Jordan'sche Normalform von A und C die Transformationsmatrix, also $J = CAC^{-1}$. Für den Spezialfall können wir die Lösung des Ausgangsproblems gewinnen, indem wir A in die Jordan'sche Normalform überführen, für diese dann die Gleichung lösen und zurücktransformieren. Es gilt

$$E(C^{-1}JC, t) = C^{-1}E(J, t)C$$

, denn $(C^{-1}JC)^n = C^{-1}J^nC$ und deswegen dürfen wir C, C^{-1} aus der Exponentialreihe herausziehen. Zur allgemeinen Lösung linearer Anfangswertprobleme müssen wir noch $E(J, t)$ ausrechnen. Wir gehen von der Gestalt (3.1.3) aus. Natürlich gilt für eine Matrix J in Blockdiagonalgestalt

$$J = \text{diag}(\mathcal{B}_1, \dots, \mathcal{B}_m),$$

dass die Matrixexponentialfunktion auch Blockdiagonalgestalt annimmt, also

$$E(J, t) = \text{diag}(E(\mathcal{B}_1, t), \dots, E(\mathcal{B}_m, t)).$$

Ist \mathcal{B} ein Block der Länge 1, also $\mathcal{B} = (\lambda)$, so ist natürlich $E(\mathcal{B}, t) = e^{\lambda t}$. Ist \mathcal{B} ein Block der Länge $r > 1$ und der zugehörige Eigenwert λ reell, so ergibt sich die Exponentialreihe aus folgenden Betrachtungen.

Definition 3.2.9 Eine Matrix N heißt *nilpotent*, wenn es ein $r \in \mathbb{N}$ gibt mit $N^r = 0$.

Lemma 3.2.10 Ein Block der Gestalt (3.1.4) ist die Summe einer Diagonalmatrix D und einer nilpotenten Matrix N .

Beweis. Natürlich ist $D = \text{diag}(\lambda, \dots, \lambda)$. Übrig bleibt die $r \times r$ Matrix

$$(3.2.11) \quad N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Eine einfache Rechnung zeigt, dass $N^r = 0$ ist. Damit ist N nilpotent. \square

Bemerkung 3.2.12 Genauer gilt, dass jede Matrix A Summe einer diagonalisierbaren und einer nilpotenten Matrix ist. Unser Beweis zeigt dies zumindest für reelle Matrizen mit ausschließlich reellen Eigenwerten.

Lemma 3.2.13 Die Matrixexponentialfunktion $E(\mathcal{B}, t)$ eines Jordan-Blocks der Länge r zum Eigenwert λ hat die Gestalt

$$(3.2.14) \quad E(\mathcal{B}, t) = e^{\lambda t} \begin{pmatrix} 1 & t & t^2/2 & t^3/6 & \dots & \frac{t^{r-1}}{(r-1)!} \\ 0 & 1 & t & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & t^3/6 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & t^2/2 \\ \vdots & & & \ddots & 1 & t \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Beweis. Es gilt $DN = ND$ und daher mit dem Hilfssatz 3.2.8

$$E(\mathcal{B}, t) = E(D + N, t) = E(D, t)E(N, t).$$

Nun ergibt $E(D, t) = e^{\lambda t} \mathbb{1}$, und da N nilpotent ist, hat man

$$E(N, t) = \mathbb{1} + tN + \frac{t^2}{2}N^2 + \dots + \frac{t^{r-1}}{(r-1)!}N^{r-1}.$$

□

Für einen nichtreellen Eigenwert stellt man die gleiche Betrachtung im Komplexen an und schneidet den Lösungsraum mit dem \mathbb{R}^n . Wir wollen die entsprechende Formel im Moment nicht angeben.

Den Lösungsraum linearer autonomer Gleichungen kann man einfach charakterisieren. Dies ist der Inhalt des nächsten Satzes, der im weiteren noch verallgemeinert wird.

Satz 3.2.15 (Algebraische Struktur des Lösungsraumes I) Sei $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$. Wir setzen $U = \{u \in C^1(\mathbb{R}, \mathbb{R}^n) \mid \dot{u} = Au\}$. U ist ein linearer Raum. Die Dimension von U ist n .

Beweis. Offensichtlich ist die Summe zweier Lösungen wieder eine Lösung. Gleiches gilt für das Produkt ξu mit $\xi \in \mathbb{R}$ und $u \in U$. Also bleibt zu zeigen, dass $\dim U = n$ ist. Sei $\mathcal{A} : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ die Abbildung $\mathcal{A}u = u(0)$. Offensichtlich ist \mathcal{A} linear und wegen der eindeutigen Lösbarkeit von Anfangswertproblemen injektiv. Wegen des globalen Existenzsatzes ist \mathcal{A} surjektiv. Also gilt $U \simeq \mathbb{R}^n$. □

Als nächsten Schritt betrachten wir die **inhomogene lineare Gleichung**, gegeben durch

$$(3.2.16) \quad \dot{u} = Au + f(t),$$

wobei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine stetige Abbildung ist. Wir wissen, aufgrund des Existenzsatzes, dass diese Gleichung bei Vorgabe eines Anfangswertes lösbar ist. Die algebraische Struktur ist natürlich etwas anders als vorher. Wie in der linearen Algebra besteht die allgemeine Lösung aus einer speziellen Lösung plus einem beliebigen Element aus U .

Satz 3.2.17 (Algebraische Struktur des Lösungsraumes II) Sei

$$U_f = \{u \in C^1(\mathbb{R}, \mathbb{R}^n) \mid \dot{u} = Au + f(t)\}.$$

U_f ist ein n -dimensionaler **affiner Unterraum** von $C^1(\mathbb{R}, \mathbb{R}^n)$. Es existiert also ein $u^0 \in C^1(\mathbb{R}, \mathbb{R}^n)$ mit der Eigenschaft, dass

$$U_f = \{u^0 + u \mid u \in U\}.$$

Beweis. Wie schon bemerkt, hat die Gleichung (3.2.16) immer eine Lösung. Sei u^0 eine solche Lösung. Dann ist natürlich für $u \in U$ auch $u^0 + u$ eine Lösung. Wir müssen noch zeigen, dass jede Lösung diese Form hat. Sei u^1 eine weitere Lösung der Gleichung (3.2.16). Dann ist $u^0 - u^1$ eine Lösung der homogenen linearen Gleichung (einfaches Nachprüfen zeigt dies). Damit ist $u^0 - u^1 \in U$. \square

Wir wollen uns noch kurz Gedanken machen, wie man eine spezielle Lösung u^0 findet.

Lemma 3.2.18 (Formel der Variation der Konstanten) Sei $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$, $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig. Sei $u_0 \in \mathbb{R}^n$. Dann ist eine spezielle Lösung der Gleichung $\dot{u} = Au + f(t)$, nämlich mit Anfangswert $u^0(0) = u_0$, gegeben durch

$$(3.2.19) \quad u^0(t) = e^{At}u_0 + \int_0^t e^{A(t-s)}f(s)ds.$$

Beweis. Differenzieren ergibt

$$\frac{d}{dt}u^0(t) = Ae^{At}u_0 + [e^{A(t-s)}f(s)]|_{s=t} + \int_0^t \frac{d}{dt}e^{A(t-s)}f(s)ds,$$

also

$$\frac{d}{dt}u^0(t) = Ae^{At}u_0 + f(t) + A \int_0^t e^{A(t-s)}f(s)ds = Au + f(t).$$

\square

3.3 Die nichtautonome lineare Gleichung

In diesem Abschnitt widmen wir uns den Gleichungen

$$(3.3.1) \quad \dot{u} = A(t)u$$

und

$$(3.3.2) \quad \dot{u} = A(t)u + f(t),$$

wobei $A : I \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ und $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetige Abbildungen auf einem offenen Intervall $I \subset \mathbb{R}$ sind. Natürlich kann man hier nicht erwarten, dass die Konstruktion der Matrixexponentialfunktion zum Ziel führt.

Lemma 3.3.3 *Das Anfangswertproblem*

$$(3.3.4) \quad \dot{\Phi} = A(t)\Phi, \quad \Phi(t_0) = \mathbb{1}$$

hat für eine stetige Abbildung $A : I \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ und $t_0 \in I$ eine eindeutige Lösung

$$\Phi = \Phi(t, t_0) : I \times I \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n).$$

Beweis. Die Existenz folgt aus den Existenzsätzen (2.1.9) und (2.1.20). \square

Definition 3.3.5 *Die Abbildung*

$$\Phi : I^2 \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$$

$$(t, t_0) \mapsto \Phi(t, t_0)$$

heißt **Übergangsmatrix**.

Man überlege sich eine anschauliche Begründung für die Terminologie.

Satz 3.3.6 (Eigenschaften der Übergangsmatrix) *Die Übergangsmatrix $\Phi(t, t_0)$ ist für jedes Paar $(t, t_0) \in I^2$ definiert und hat die Eigenschaften*

- $\Phi(t, t) = \mathbb{1}$;
- $\Phi(t, s)\Phi(s, t_0) = \Phi(t, t_0) \quad \forall (t, s, t_0) \in I^3$;
- $\Phi(t, t_0)^{-1} = \Phi(t_0, t)$.

Beweis. Die erste Eigenschaft ist nach Definition gegeben. Für die zweite Aussage betrachtet man die matrixwertige Funktion $\Psi(t) = \Phi(t, s)\Phi(s, t_0)$. Sie genügt der Differentialgleichung

$$\dot{\Psi}(t) = A\Psi(t)$$

mit dem Anfangswert $\Psi(s) = \mathbb{1}\Phi(s, t_0)$. Offenbar ist $\Phi(\cdot, t_0)$ eine Lösung derselben Differentialgleichung und für $t = s$ hat man den Wert $\Phi(s, t_0)$. Eindeutigkeit der Lösung des Anfangswertproblems liefert die Gleichheit der linken und der rechten Seite. Die dritte Aussage ist eine unmittelbare Konsequenz der ersten beiden. \square

Wie zuvor sei nun $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall, $A : I \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ eine stetige Abbildung. Analog zu vorhin sei

$$U = \{u \in C^1(I, \mathbb{R}^n) \mid \dot{u} = A(t)u\}.$$

Wir setzen für eine stetige Funktion $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$

$$U_f = \{u \in C^1(I, \mathbb{R}^n) \mid \dot{u} = A(t)u + f\}.$$

Sei $U = U_0$. Wir notieren einige einfache Aussagen.

- Lemma 3.3.7**
1. $u^1 \in U_f, u^2 \in U_g \Rightarrow u^1 + u^2 \in U_{f+g}$ [Superpositionsprinzip];
 2. $\dim U_0 = n$;
 3. Sei $u_0 \in U_f$ fest. Dann ist $U_f = \{u_0 + u \mid u \in U\}$. [Algebraische Struktur des Lösungsraumes III];
 4. Jedes $u \in U$ hat die Darstellung $u(t, t_0, u_0) = \Phi(t, t_0)u_0$.

Beweis. Die erste Aussage ist elementar. Die dritte Aussage folgt unmittelbar aus dem vorangegangenen Lemma (3.3.3). Für die zweite fixieren wir einen Zeitpunkt $t_0 \in I$ und zeigen wie zuvor, dass die Abbildung $\mathcal{A} : U \rightarrow \mathbb{R}^n : u \mapsto u(t_0)$ ein Isomorphismus ist. Die letzte Aussage folgt wieder aus der Eindeutigkeit: Sei u Lösung des Anfangswertproblems

$$\dot{u} = Au, \quad u(t_0, t_0, u_0) = u_0.$$

Dann ergibt sich für $v(t) = \Phi(t, t_0)u_0$

$$\dot{v} = \dot{\Phi}(t, t_0)u_0 = A\Phi(t, t_0)u_0 = Av, \quad v(t_0) = \Phi(t_0, t_0)u_0 = u_0.$$

Also ist $u = v$. □

Wie zuvor erhält man aus der Formel der Variation der Konstanten die Darstellung der Lösung der inhomogenen Gleichung.

Satz 3.3.8 (Variation der Konstanten) Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall, $A : I \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ und $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ seien stetig, $t_0 \in I$. Sei $\Phi : I^2 \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ die zugehörige Übergangsmatrix. Dann hat die Lösung $u(t, t_0, u_0)$ des Anfangswertproblems

$$(3.3.9) \quad \begin{aligned} \dot{u} &= A(t)u + f(t) \\ u(0) &= u_0 \end{aligned}$$

die Lösung

$$u(t, t_0, u_0) = \Phi(t, t_0)u_0 + \int_{t_0}^t \Phi(t, s)f(s)ds.$$

Beweis. Sei

$$v(t) = \Phi(t, t_0)u_0 + \int_{t_0}^t \Phi(t, s)f(s)ds.$$

Dann ist $v(t_0) = \mathbb{1}u_0 = u_0$ und

$$\dot{v} = A(t)\Phi(t, t_0)u_0 + f(t) + \int_{t_0}^t A(t)\Phi(t, s)f(s)ds = Av + f.$$

Die Eindeutigkeit der Lösung bringt das gewünschte Resultat.

3.4 Ebene lineare Systeme

In diesem Abschnitt wollen wir ebene, lineare und autonome Systeme charakterisieren. Wir betrachten also eine Gleichung der Form

$$(3.4.1) \quad \dot{u} = Au,$$

wobei $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^2, \mathbb{R}^2)$ eine lineare Abbildung ist. Seien λ_1, λ_2 die Eigenwerte von A . Wir unterscheiden:

1. $\lambda_1 > \lambda_2 > 0$;
2. $\lambda_1 = \lambda_2 > 0$;
3. $\lambda_1 = \overline{\lambda_2}, \operatorname{Re}\lambda_1 > 0$;
4. $\lambda_1 > \lambda_2 = 0$;
5. $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$;
6. $\operatorname{Re}\lambda_1 = \operatorname{Re}\lambda_2 = 0, \lambda_i \neq 0$;
7. $\lambda_1 > 0 > \lambda_2$;
8. $\lambda_1 = \lambda_2 < 0$;
9. $\lambda_1 < \lambda_2 < 0$;
10. $\lambda_1 = \overline{\lambda_2}, \operatorname{Re}\lambda_1 < 0$;
11. $\lambda_1 < \lambda_2 = 0$.

1. Fall: Dabei hat die Jordan Normalform die Gestalt

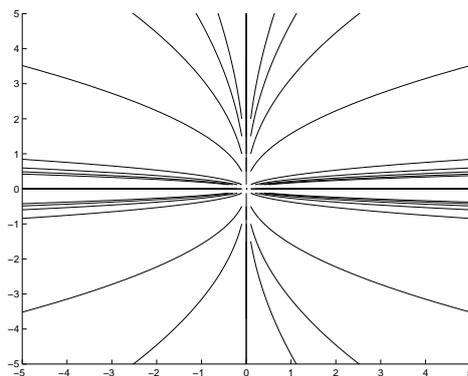
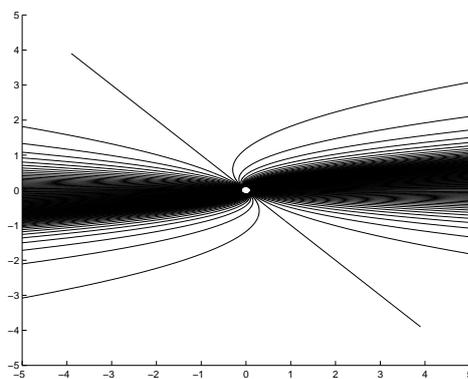
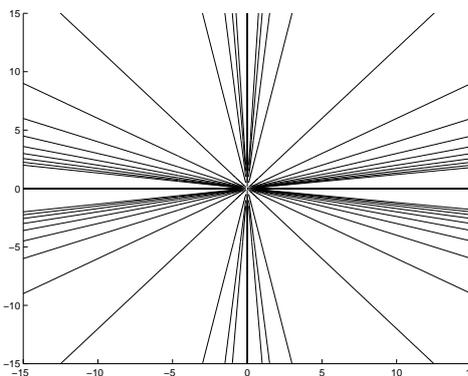
$$(3.4.2) \quad J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$$

Seien e_1, e_2 die Eigenvektoren zu $\lambda_{1,2}$. Dann konvergieren alle Lösungen für $t \rightarrow -\infty$ gegen Null, für $t \rightarrow \infty$ verlassen alle Lösungen (außer einer!) jedes Kompaktum. Sie schmiegen sich (für $t \rightarrow -\infty$) an die e_2 -Achse an.

2. Fall: Wir unterscheiden zwei mögliche Formen des Jordan Blocks (Eigenwerte sind geometrisch einfach oder nicht). Zunächst der Fall der geometrisch einfachen Eigenwerte. Hier hat der entsprechende Jordanblock die Form

$$(3.4.3) \quad J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_1 \end{pmatrix}.$$

Alle Lösungen haben dieselben Konvergenzeigenschaften wie zuvor. Nur ist die Bewegung längs gerader Linien.

Abbildung 3.1: Die Trajektorien von $E(J, t)$.Abbildung 3.2: Die Trajektorien von $E(A, t)$ mit schief liegenden Eigenräumen.Abbildung 3.3: Die Trajektorien von $E(J, t)$ mit halbeinfachen Eigenwerten.

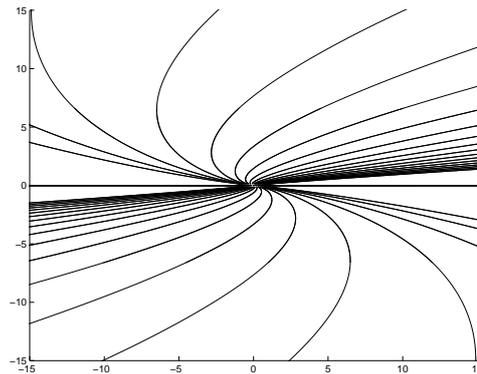


Abbildung 3.4: Die Trajektorien von $E(J, t)$ mit geometrisch einfachem, algebraisch doppeltem Eigenwert.

Ist der Eigenwert nicht geometrisch einfach, so hat der Jordanblock die Gestalt

$$(3.4.4) \quad J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 1 \\ 0 & \lambda_1 \end{pmatrix}.$$

Auch hier hat man die Konvergenzeigenschaften wie im ersten Fall, jedoch schaut das Bild wiederum anders aus.

3. Fall: Wieder ergibt sich die gleiche Konvergenz, jedoch erhält man einen Strudel. Sei $\lambda_1 = |\lambda|e^{i\theta}$. Dann ist $\lambda_2 = |\lambda|e^{-i\theta}$ und die reelle Normalform hat die Form

$$(3.4.5) \quad J = |\lambda| \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

4. Fall: Für die Jordan-Form ergibt sich

$$(3.4.6) \quad J = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Längs der e_2 -Achse hat man konstante Lösungen (**Ruhelagen**). Alle anderen Lösungen konvergieren für $t \rightarrow -\infty$ gegen 0 und verlassen in positiver Zeitrichtung jedes Kompaktum.

5. Fall: In diesem Fall hat die Jordan-Form das Aussehen

$$(3.4.7) \quad J = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

oder

$$(3.4.8) \quad J = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Der erste dieser beiden Fälle liefert ausschließlich konstante Lösungen. Im zweiten hat man eine Bewegung auf Parallelen zur e_1 -Achse gegen unendlich.

6. Fall: Unsere Abbildung erhält die Gestalt

$$(3.4.9) \quad J = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

Wir erhalten Lösungen, die sich auf Kreislinien um den Ursprung bewegen.

7. Fall: Ein qualitativ neues Bild ergibt sich hier. Auf der einen Achse bewegt man sich für $t \rightarrow \infty$ gegen unendlich und für $t \rightarrow -\infty$ gegen Null, auf der anderen Achse hat man das gegenteilige Verhalten. Dazwischen sind Lösungen, die für beide Zeitrichtungen jedes Kompaktum verlassen und sich für $t \rightarrow \pm\infty$ an die jeweilige Eigenwertachse anschmiegen. (Dies ist die Motivation für den Begriff **hyperbolisch**, den wir noch einführen werden.)

In den anderen Fällen ergeben sich ganz ähnliche Bilder wie bisher, nur die Zeitrichtungen sind anders. Wir geben nur die Normalformen und die Bilder, keine weiteren Kommentare.

$$(3.4.10) \quad J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$$

8. Fall:

$$(3.4.11) \quad J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_1 \end{pmatrix}$$

oder

$$(3.4.12) \quad J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 1 \\ 0 & \lambda_1 \end{pmatrix}$$

9. Fall:

$$(3.4.13) \quad J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$$

10. Fall:

$$(3.4.14) \quad J = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

11. Fall:

$$(3.4.15) \quad J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

3.5 Eigenwerte und Langzeitverhalten

Die Betrachtungen im vorstehenden Abschnitt legen es nahe zu vermuten, dass die Eigenwerte und das Langzeitverhalten für lineare autonome Systeme eng gekoppelt sind. Wir wollen dieses bestätigen.

Satz 3.5.1 (Spektrum und Stabilität I) Sei $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$. Wir betrachten die Differentialgleichung

$$\dot{u} = Au.$$

Mit $\sigma(A)$ bezeichnen wir das Spektrum von A , d.h. $\sigma(A)$ ist die Menge aller Eigenwerte von A . Dann hat man folgendes Verhalten:

Haben alle Eigenwerte negativen Realteil, so ist 0 die einzige beschränkte Lösung und alle anderen konvergieren für $t \rightarrow \infty$ gegen 0. Für $t \rightarrow -\infty$ hat man Konvergenz gegen unendlich. Gibt es einen Eigenwert mit positivem Realteil, so gibt es eine Lösung, die für $t \rightarrow -\infty$ gegen 0 konvergiert und für $t \rightarrow \infty$ jedes Kompaktum verläßt.

Gibt es einen Eigenwert mit Realteil 0, so existiert zumindest eine Lösung $u(t, u_0)$, $u_0 \neq 0$, welche für alle Zeiten beschränkt ist.

Beweis. Angenommen, u_0 ist Anfangswert einer beschränkten Lösung $u(t, u_0)$. Jede Lösung der linearen Gleichung hat wegen der Bemerkung nach Satz 3.2.6 die Darstellung $u(t, u_0) = E(A, t)u_0$. Sei C die Matrix, die A in die komplexe Jordan-Normalform J transformiert, $v_0 = Cu_0$ ist dann der Anfangswert für eine beschränkte Lösung $v(t) = E(J, t)v_0$. Sei $v_0 = (v_0^1, \dots, v_0^n)$. Ist $u_0 \neq 0$, so ist $v_0 \neq 0$ und es gibt ein $\mu \in \{1, \dots, n\}$ mit $v_0^\mu \neq 0$ und für $m \in \{\mu + 1, \dots, n\}$ ist $v_0^m = 0$. Sei λ der Eigenwert zum μ -ten Eigenvektor in der Basis zur Jordan-Form. So ist die μ -te Komponente von $E(J, t)v_0$ gegeben durch $e^{\lambda t}v_0^\mu$. Dann ist $|e^{\lambda t}v_0^\mu| = e^{\operatorname{Re}(\lambda)t}|v_0^\mu|$. Für $t \rightarrow -\infty$ ist dies unbeschränkt. Um die Konvergenz zu zeigen, betrachten wir $\nu = \max\{\operatorname{Re}(\lambda) \mid \lambda \in \sigma(A)\}$. Dann ist $\nu < 0$ und $E(J, t) = e^{\nu/2 t}F(t)$. Dabei ist F eine matrixwertige Funktion. Jedes $F(t)$ ist eine obere Dreiecksmatrix, mit Einträgen $e^{\rho t}p(t)$, wobei p ein Polynom ist und $\operatorname{Re}(\rho) < 0$. Dann ist $\|F(t)\|$ beschränkt und $\|E(J, t)\| \rightarrow 0$ für $t \rightarrow \infty$. Damit konvergiert auch

$$\|E(A, t)\| = \|C^{-1}E(J, t)C\| \leq \|C\| \|E(J, t)\| \|C\|$$

für $t \rightarrow \infty$ gegen null.

Die zweite Aussage beweist man ebenso wie die Unbeschränktheit für $u(t, u_0)$ für $t \rightarrow -\infty$ im ersten Fall. Man betrachtet hier einfach einen Anfangswert im verallgemeinerten Eigenraum zum Eigenwert mit positivem Realteil.

Die dritte Aussage erhält man, indem man einen Eigenvektor als Anfangswert im Eigenraum des Eigenwertes λ mit verschwindendem Realteil betrachtet. Hier unterscheidet man zwei Fälle:

- (a) $\lambda = 0$,
- (b) $\lambda \neq 0$.

Der erste dieser Fälle ist einfach. Ist u_0 im Kern von A , so ist natürlich $E(A, t)u_0 = u_0$ für alle t . Damit ist die Lösung $u(t, u_0) = u_0$ eine konstante und damit beschränkte

Lösung.

Im zweiten Fall hat man im Komplexen einen Anfangswert u_0^c , so dass $E(A, t)u_0^c = e^{\lambda t}u_0^c$ ist, also gilt $|E(A, t)u_0^c| = |e^{\lambda t}u_0^c| = |u_0^c|$. Wir setzen $u_0 = u_0^c + \overline{u_0^c}$. Dies ist ein reeller Vektor. Es gilt $E(A, t)u_0 = e^{\lambda t}u_0^c + e^{-\lambda t}\overline{u_0^c}$. Da $\bar{\lambda} = -\lambda$, ist dies immer reell. Da beide Summanden in der Norm beschränkt sind, folgt dies auch für $E(A, t)u_0$. \square

3.6 Aufgaben

Aufgabe 3.6.1 Wir bezeichnen mit A^T die Transponierte einer reellen Matrix A und mit $\text{tr}(A)$ die Spur von A . Man zeige:

(a) $\det E(A, t) = e^{\text{tr}(A)t}$

(b) $E(A^T, t) = (E(A, t))^T$

(c) Ist A schiefsymmetrisch, d.h. $A + A^T = 0$, so ist $E(A, t)$ für alle $t \in \mathbb{R}$ orthogonal. (Eine Matrix B heißt orthogonal, wenn $B^T B = B B^T = \mathbb{1}$ ist.)

Aufgabe 3.6.2 Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig und beschränkt, $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$. A habe keinen Eigenwert λ mit $\text{Re}(\lambda) = 0$.

(a) Man zeige: Die Gleichung $\dot{u} = Au + f(t)$ besitzt eine beschränkte Lösung.

(b) Ist diese Lösung eindeutig?

(c) Ist f periodisch mit Periode $T > 0$, so ist auch die in (a) gefundene Lösung T -periodisch.

Aufgabe 3.6.3 Man finde $E(A, t)$ für folgende Matrizen

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Wie sieht $E(A, t)u_0$ für verschiedene $u_0 \neq 0$ aus.

Aufgabe 3.6.4 Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall, $A : I \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ eine stetige Abbildung. Gegeben seien n Lösungen u_1, \dots, u_n der Differentialgleichung $\dot{u} = A(t)u$.

(a) Man zeige: Gibt es ein $\tau \in I$, so dass die Vektoren $u_1(\tau), \dots, u_n(\tau)$ linear unabhängig sind, so sind die Vektoren $u_1(t), \dots, u_n(t)$ für alle $t \in I$ linear unabhängig. Man nennt dann $u_1(t), \dots, u_n(t)$ ein **Fundamentalsystem** und die Matrix $Y(t)$, deren Spalten aus den Vektoren $u_1(t), \dots, u_n(t)$ besteht, **Fundamentalmatrix**.

(b) Ist $Y(t)$ eine Fundamentalmatrix, so nennt man die reellwertige Funktion $w(t) = \det Y(t)$ die **Wronski-Determinante** von A . Man zeige: w löst die Differentialgleichung $\dot{w} = \text{tr}(A)w$.

Aufgabe 3.6.5 Sei $A : I \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ eine stetige Abbildung auf einem Intervall $I \subset \mathbb{R}$. Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ eine offene, nichtleere Teilmenge und $t_0 \in I$ sei fest gewählt. Setze

$$U(t) = \{u(t, t_0, u_0) \mid u_0 \in U\},$$

wobei $u(t, t_0, u_0)$ die Lösung des Anfangswertproblems $\dot{u} = A(t)u$, $u(t_0, t_0, u_0) = u_0$ bezeichnet. Mit μ bezeichnen wir das Lebesgue Maß auf \mathbb{R}^n . Man gebe eine hinreichende Bedingung an A dafür, dass $\mu(U(t)) = \mu(U)$ für alle $t \in \mathbb{R}$ gilt.

Aufgabe 3.6.6 Man löse die Differentialgleichungen

$$(a) \quad \dot{u} + u \sin(t) = (\sin(t))^3 \quad (b) \quad (1 + t^2)\dot{u} + tu = t.$$

Kapitel 4

Berechnung von Lösungen

4.1 Eulers Polygonzugmethode

Die Grundlage dieser Methode ist die einfache Beobachtung, dass $f(u, t)$ in der Nähe eines Punktes als nahezu konstant angesehen werden kann. Man wählt daher eine (kleine) Schrittweite h und ersetzt $u(t)$ durch die Approximation

$$u_h(t_n) = u_h(t_{n-1}) + hf(u_h(t_{n-1}), t_{n-1})$$

Diese Methode ist einfach durchzuführen. Natürlich kann man keine übermäßig gute Approximation erwarten. Jedoch hat man den folgenden Satz, der zumindest noch theoretische Konvergenz vorhersagt. Man beachte, dass die Näherungslösung nicht für alle t im Existenzintervall definiert ist. Deshalb muß man nach Wahl einer Zahl t im Existenzintervall der Lösung sich auf Schrittweiten

$$h_n = (t - t_0)/n$$

beschränken.

Satz 4.1.1 Sei $u(t, t_0, u_0)$ Lösung eines Anfangswertproblems der Form (2.1.2), (2.1.3) mit einer Lipschitz-stetigen Funktion $f : W \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Es sei $u_{h_n}(t_k, t_0, u_0)$ der Wert, den das Euler'sche Verfahren nach k Schritten liefert. Dann konvergiert $u_{h_n}(t_n, t_0, u_0)$ für $n \rightarrow \infty$, d.h.

$$u_{h_n}(t_n, t_0, u_0) \rightarrow_{n \rightarrow \infty} u(t, t_0, u_0).$$

Bevor wir diesen Satz beweisen, geben wir noch einen Hilfssatz an, der eine wichtige Abschätzung liefert.

Hilfssatz 4.1.2 Seien $\{\zeta_n\}_{n \in \mathbb{N}_0}$ eine Folge reeller Zahlen, $\alpha \geq 0$ und $\beta > 0$ mit

$$(4.1.3) \quad |\zeta_{n+1}| \leq \alpha + (1 + \beta)|\zeta_n| \quad n \in \mathbb{N}_0.$$

Dann genügt die Folge $\{|\zeta_n|\}_{n \in \mathbb{N}}$ der Abschätzung

$$(4.1.4) \quad |\zeta_n| \leq e^{n\beta}|\zeta_0| + \alpha \frac{e^{n\beta} - 1}{\beta}.$$

Beweis des Hilfssatzes 4.1.2. Durch eine einfache Induktion erhält man die Aussage

$$(4.1.5) \quad |\zeta_n| \leq (1 + \beta)^n |\zeta_0| + \alpha \frac{(1 + \beta)^n - 1}{\beta}.$$

Für $n = 1$ ist dies genau die Voraussetzung (4.1.3). Angenommen die Gleichung (4.1.5) ist für n gültig. Dann folgt daraus, dass

$$|\zeta_{n+1}| \leq \alpha + (1 + \beta)^{n+1} |\zeta_0| + \alpha(1 + \beta) \frac{(1 + \beta)^n - 1}{\beta}$$

und daher folgt

$$|\zeta_{n+1}| \leq (1 + \beta)^{n+1} |\zeta_0| + \alpha \frac{(1 + \beta)^{n+1} - (1 + \beta) + \beta}{\beta}.$$

Dies ist (4.1.5) für $n + 1$. Weil $(1 + \beta)^n \leq e^{n\beta}$ ist (sogar für $\beta > -1$) folgt aus (4.1.5) die Aussage des Hilfssatzes. \square

Beweis des Satzes 4.1.1. Sei $G = \{(u(s), s) \mid s \in [t_0, t] \text{ (oder } [t, t_0])\}$. O.B.d.A. dürfen wir annehmen, dass $t > t_0$ ist. Die Modifikationen für den anderen Fall sind nahezu offensichtlich. Sei W eine Umgebung von G mit kompaktem Abschluß \overline{W} , so dass für f bezüglich der ersten Variablen auf W eine Lipschitz Konstante M_W existiert, d.h. eine Konstante mit der die Ungleichung (2.1.6) erfüllt ist. Wie schon zuvor setzen wir wie schon zuvor $M = \max\{1, M_W\}$, $N = \sup\{|f(u, s)| \mid (u, s) \in W\} + 1$ und $\Delta = \text{dist}(G, \partial U)$. Für $\varepsilon < \frac{\Delta}{2M}$ sei

$$G_\varepsilon = \{(u, t) \in W \mid \text{dist}((u, t), G) < \varepsilon\}.$$

Für $n \in \mathbb{N}$, $t_k = t_0 + kh_n$ und $(u_1, t_k) \in G_\varepsilon$ mit $|u_1 - u(t_k, t_0, u_0)| < \varepsilon$ berechnen wir die Distanz von $(u_1, t_k) + h_n(f(u_1, t_k), 1)$ zu $u(t_{k+1}, t_0, u_0)$. Sei $u^k = u(t_k, t_0, u_0)$. Damit ist $u^{k+1} = u(t_{k+1}, t_0, u_0) = u(t_k + h_n, t_k, u^k)$. Es ergibt sich die Formel

$$u^{k+1} = u^k + \int_{t_k}^{t_k+h_n} f(u(s, t_k, u^k), s) ds = \int_0^{h_n} f(u(t_k + s, t_k, u^k), t_k + s) ds.$$

Für die Differenz erhält man daher

$$\begin{aligned} |(u_1, t_k) + h_n(f(u_1, t_k), 1) - (u^{k+1}, t_{k+1})| &\leq |u_1 - u^k| \\ &\quad + \int_0^{h_n} |f(u_1, t_k) - f(u(t_k + s, t_k, u^k), t_k + s)| ds \\ &\leq |u_1 - u^k| + h_n |f(u_1, t_k) - f(u^k, t_k)| + h_n s(h_n) \\ &\leq (1 + Mh_n) |u_1 - u^k| + h_n s(h_n), \end{aligned}$$

wobei $s(\cdot)$ eine Funktion ist, mit der Eigenschaft $s(h) \rightarrow 0$ für $h \rightarrow 0$. Die Existenz einer solchen Funktion erhält man einfach:

$$\begin{aligned} \int_0^{h_n} |f(u_1, t_k) - f(u(t_k + s, t_k, u^k), t_k + s)| ds &\leq h_n |f(u_1, t_k) - f(u^k, t_k)| \\ + \int_0^{h_n} |f(u^k, t_k) - f(u(t_k + s, t_k, u^k), t_k + s)| ds. \end{aligned}$$

Aus der Differenzierbarkeit von f folgt die Zwischenbehauptung. Ist nun u_1 der Punkt der durch k Schritte des Euler Verfahrens definiert wurde, so gilt für den Abstand $\zeta_k = |u_{h_n}(t_k, t_0, u_0) - u^k|$ eine Abschätzung der Form

$$\zeta_{k+1} \leq (1 + Mh_n)|\zeta_k| + s(h_n)h_n.$$

Mit $\alpha = s(h_n)h_n$ und $\beta = Mh_n$ und dem Hilfssatz 4.1.2 schließt man, dass der Fehler nach k Schritten abzuschätzen ist durch

$$(4.1.6) \quad \zeta_k \leq e^{k\beta}\zeta_0 + \alpha \frac{e^{k\beta} - 1}{\beta}.$$

Da $\zeta_0 = 0$ ist erhält man die Abschätzung

$$\zeta_k \leq \alpha \frac{e^{k\beta} - 1}{\beta}.$$

Wir müssen noch zeigen, dass der Ausdruck rechts durch die Wahl von h_n für alle $k \leq n$ kleiner als ε wird. Dann ist der Satz bewiesen. Eine einfache Rechnung zeigt aber, dass der Ausdruck rechts mit h_n gegen Null konvergiert:

$$\begin{aligned} \zeta_k &\leq h_n s(h_n) \frac{e^{kMh_n} - 1}{Mh_n} \\ &\leq s(h_n) \frac{e^{nMh_n} - 1}{M} \\ &\leq s(h_n) \frac{e^{M(t-t_0)}}{M} \xrightarrow{h_n \rightarrow 0} 0. \end{aligned}$$

□

In Worten besagt dieser Satz, dass man auf endlichen Zeitintervallen, durch Wahl einer genügend kleinen Schrittweite die Lösung mit dem Euler Verfahren approximieren kann. Leider kann man genötigt werden, die Schrittweite sehr klein zu wählen, wobei man in der Praxis natürlich schnell an die Grenzen stößt. Wir werden dies in der Aufgabe 4.4.3 einsehen. Ein zweiter gewichtiger Nachteil ist, dass gewisse qualitative Phänomene nicht erkannt werden können. Wir werden dies an einem Beispiel sehen, vgl. Aufgabe 4.4.2. Man beachte, dass beim numerischen Rechnen noch zusätzlich Rundungsfehler auftreten.

Trotz dieser wichtigen Aussage, haben wir am Beispiel des harmonischen Oszillators gesehen, dass das Euler'sche Polygonzugverfahren ein falsches qualitatives Verhalten vorhersagt, insbesondere finden wir keine periodischen Lösungen. Wir benötigen daher andere Verfahren.

4.2 Das implizite Euler-Verfahren

Hier wird zumindest eines der beiden genannten Probleme vermieden. Natürlich kann man nicht erwarten, dass alle Mängel bei der Beschreibung gewisser qualitativer Phänomene behoben werden. Hier bestimmt man die Näherungslösung nicht dadurch,

dass man tangential um die Schrittweite h weitergeht, sondern man bestimmt die $(k + 1)$ -Näherung aus der k -ten durch die *implizite Bedingung*

$$y_{k+1} = y_k + hf(y_{k+1}, x_{k+1}).$$

Dies bedeutet, dass man in jedem Schritt ein Gleichungssystem lösen muß. Deswegen ist die praktische Durchführung mit einem wesentlich größeren Rechenaufwand verbunden. Hat man eine lineare Abbildung $A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, so lautet die Bedingung

$$y_{k+1} = y_k + hAy_{k+1}$$

und daraus erhält man

$$(\mathbb{1} - hA)y_{k+1} = y_k.$$

Ist die Schrittweite h genügend klein, so läßt sich die Matrix $\mathbb{1} - hA$ invertieren und die Iteration hat die Darstellung

$$y_{k+1} = (\mathbb{1} - hA)^{-1}y_k.$$

(Für allgemeines f (stetig, bzgl. der ersten Komponente Lipschitz-stetig, folgt die eindeutige Lösbarkeit des Gleichungssystems

$$u_{k+1} - hf(u_{k+1}, t_{k+1}) = u_k$$

aus dem Satz über implizite Funktionen.) An dieser Darstellung erkennt man, dass dieses Verfahren, zumindest wenn alle Eigenwerte von A negativen Realteil haben, das Verhalten der Lösungen zufriedenstellend wiedergibt. Ist nämlich y_0 Eigenvektor von A zum Eigenwert λ mit $\operatorname{Re}\lambda < 0$ so lautet die Folge der y_k

$$y_k = \left(\frac{1}{1 - h\lambda} \right)^k y_0.$$

Da der auftretende Bruch betragsmäßig kleiner als 1 ist, konvergiert die Folge der y_k gegen Null, wie es auch die wahre Lösung tut.

Definition 4.2.1 Ein Verfahren (zur numerischen Lösung von Anfangswertproblemen) heißt *absolut stabil*, wenn für lineare Systeme, deren Eigenwerte alle negativen Realteil besitzen, jede Näherungslösung für $t \rightarrow \infty$ gegen Null konvergiert.

Lemma 4.2.2 Das implizite Euler-Verfahren ist absolut stabil.

Beweis. Folgt sofort aus dem zuvor gesagten. □

Tatsächlich hat man Konvergenz gegen Null für manche A mit Eigenwerten mit positiven Realteilen. Konvergenz gegen Null tritt genau dann auf, wenn $\sigma(\mathbb{1} - hA)$ außerhalb des Einheitskreises liegt. Dies ist genau dann der Fall, wenn die Eigenwerte von A außerhalb eines Kreises vom Radius $1/h$ um den Punkt $(1/h, 0)$ liegen.

4.3 Das Runge-Kutta-Verfahren

Das Runge-Kutta Verfahren ist wie das Euler'sche Polygonzugverfahren ein Einschrittverfahren, d.h. von der Form

$$y_{n+1} = y_n + h \Phi(y_n, t, h),$$

nur, dass in diesem Fall der Schritt auf relativ komplizierte Weise berechnet wird. Wir wollen zunächst das Verfahren beschreiben und danach theoretische Eigenschaften herleiten. Soll deutlich werden, dass Φ auch von f abhängt, so schreiben wir $\Phi(y, t, h, f)$. Wir setzen

$$(4.3.1) \quad \Phi(y, t, h) = \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4),$$

wobei die k_i durch

$$(4.3.2) \quad \begin{cases} k_1 = f(y, t) \\ k_2 = f\left(y + \frac{1}{2}hk_1, t + \frac{h}{2}\right) \\ k_3 = f\left(y + \frac{1}{2}hk_2, t + \frac{h}{2}\right) \\ k_4 = f(y + hk_3, t + h) \end{cases}$$

definiert werden. Erste Tests zeigen uns, dass man mit Hilfe des Runge-Kutta-Verfahrens qualitative Eigenschaften, wie z.B. periodische Lösungen beim mathematischen Pendel, gut wiederfindet. Es stellt sich die Frage nach einer theoretischen Begründung dieser angenehmen Eigenschaften.

Dazu brauchen wir ein paar Begriffe und Definitionen. Eine wichtige Rolle spielt die Approximation des Differenzenquotienten der wahren Lösung an einer Stelle durch Φ . Wir setzen

$$(4.3.3) \quad \Delta(y, t, h, f) = \begin{cases} \frac{y(t+h) - y(t)}{h} & h \neq 0 \\ f(y, t) & h = 0 \end{cases},$$

wobei $y(\cdot)$ eine Lösung mit $y(t) = y$ ist.

Definition 4.3.4 *Der lokale Diskretisierungsfehler ist die Differenz*

$$\tau(y, t, h) = \Delta(y, t, h, f) - \Phi(y, t, h, f).$$

Offenkundig ist $\lim_{h \rightarrow 0} \Delta(y, t, h, f) = f(y, t)$. Also konvergiert $\Phi(y, t, h, f)$ genau dann gegen $f(y, t)$, wenn $\lim_{h \rightarrow 0} \tau(y, t, h) = 0$.

Damit sehen wir, dass der lokale Diskretisierungsfehler für die Konvergenz des Verfahrens eine große Rolle spielen wird.

Definition 4.3.5 Ein Einschrittverfahren heißt konsistent, falls $\lim_{h \rightarrow 0} \tau(y, t, h) = 0$ erfüllt ist.

Beispiel 4.3.6 Das Euler'sche Polygonzugverfahren ist konsistent. Dort ist $\Phi(y, t, h, f) = f(y, t)$, und wegen der Konvergenz von Δ gegen f konvergiert $\tau \rightarrow 0$.

Natürlich interessiert nicht nur, ob die Größe τ konvergiert, sondern auch die Konvergenzrate. Um diese auszurechnen, benötigen wir höhere Differenzierbarkeit von f .

Definition 4.3.7 Wir nennen ein Einschrittverfahren von der **Ordnung** $p \in \mathbb{N}$, wenn für jedes $f \in C^{p-1}(I \times W, \mathbb{R}^n)$ gilt

$$\tau(y, t, h, f) = O(|h|^p).$$

Beispiel 4.3.8 Wir kehren zum Euler'schen Polygonzugverfahren zurück und berechnen die Ordnung des Verfahrens.

Dazu bemerken wir, dass für eine Lösung (mit $y(t_0) = y_0$) gilt

$$(4.3.9) \quad y(t_0 + h) = y_0 + h\dot{y}(t_0) + \frac{h^2}{2}\ddot{y}(t_0) + \dots$$

Wegen $\dot{y}(t_0) = f(y_0, t_0)$ und $\ddot{y} = f_y(y(t), t)$ errechnet sich $\ddot{y}(t_0)$ zu

$$\ddot{y}(t_0) = \frac{d}{dt}f(y(t), t)|_{t=t_0} = f_t(y_0, t_0) + f_y(t_0)\dot{y}(t_0) = f_t(y_0, t_0) + f_y(y_0, t_0)f(y_0, t_0).$$

Den lokalen Diskretisierungsfehler beim Euler'schen Polygonzugverfahren für $h \neq 0$ erhält man nun durch Entwicklungen von Δ und Φ nach Potenzen von h . Zunächst ergibt sich für $h \neq 0$

$$\begin{aligned} \Delta(y_0, t_0, h, f) &= \frac{1}{h} (y(t_0 + h) - y(t_0)) \\ &= \frac{1}{h} \left(y_0 + hf(t_0, y_0) + \frac{h^2}{2}(f_t(y_0, t_0) + f_y(y_0, t_0)f(y_0, t_0)) + \dots - y_0 \right) \\ &= f(y_0, t_0) + O(|h|). \end{aligned}$$

Wir notieren Δ bis zur ersten Ordnung in h als

$$(4.3.10) \quad \Delta(y_0, t_0, h, f) = f(y_0, t_0) + \frac{h}{2}(f_t(y_0, t_0) + f_y(y_0, t_0)f(y_0, t_0)).$$

Wegen $\Phi(y_0, t_0, h, f) = f(y_0, t_0)$ ergibt sich für den lokalen Diskretisierungsfehler $O(|h|)$:

$$\begin{aligned} \tau(y_0, t_0, h, f) &= \Delta(y_0, t_0, h, f) - \Phi(y_0, t_0, h, f) \\ &= f(y_0, t_0) + \frac{h}{2}(f_t(y_0, t_0) + f_y(y_0, t_0)f(y_0, t_0)) - f(y_0, t_0) \\ &= \frac{h}{2}(f_t(y_0, t_0) + f_y(y_0, t_0)f(y_0, t_0)). \end{aligned}$$

Also ist das Euler Verfahren ein Verfahren erster Ordnung.

Satz 4.3.11 *Das Verfahren von Runge-Kutta ist konsistent und von vierter Ordnung.*

Beweis. Aus der Definition von Φ mittels der k_j erhalten wir mit $k_0 = 0 = h_0$

$$\begin{aligned} k_j &= f(t + h_j, y + h_j k_{j-1}) \\ &= f(y, t) + f_t(y, t)h_j + f_y(y, t)h_j k_{j-1} + f_{tt}(y, t)\frac{h_j^2}{2} + \\ &\quad + f_{ty}(y, t)h_j^2 k_{j-1} + \frac{1}{2}h_j^2 f_{yy}(y, t)[k_{j-1}, k_{j-1}] + O(|h|^3). \end{aligned}$$

Damit ergibt sich unter Ausnutzung, dass jedes der k_j in nullter Ordnung gleich $f(y, t)$ ist

$$\begin{aligned} \Phi(y, t, h, f) &= \frac{1}{6} \left(f(y, t) + 2f(y, t) + 2f(y, t) + f(y, t) + \frac{h}{2}(2f_t(y, t) + \right. \\ &\quad \left. + 2f_y(y, t)k_1 + 2f_t(y, t) + 2f_y(y, t)k_2 + f_t(y, t) + f_y(y, t)k_3) + O(|h|^2) \right) \\ &= \frac{h}{6}(3f_t(y, t) + 3f_y(y, t)f(y, t) + O(|h|^2)) \\ &= \frac{1}{2}h(f_t(y, t) + f_y(y, t)f(y, t)) + O(|h|^2). \end{aligned}$$

Aufgrund der obigen Formel (4.3.10) zur Berechnung des (in h) linearen Terms des Differenzenquotienten erhalten wir

$$\tau(y, t, h, f) = O(|h|^2).$$

Eine etwas umfangreichere Rechnung ergibt auch noch die Übereinstimmung der kubischen Terme von Δ und Φ , und damit ist das Runge-Kutta-Verfahren konsistent und von vierter Ordnung. \square

Dass das Verfahren von vierter Ordnung ist, besagt, dass in einem Schritt der Approximationsfehler höchstens $c \cdot |h|^4$ ist, wobei über die Fehlerschranke c noch nichts gesagt ist. In der Praxis wollen wir natürlich nicht nur einen Schritt berechnen, was für $h \rightarrow 0$ auch beliebig wenig aussagekräftig wäre. Stattdessen wollen wir makroskopische Stücke der Lösungskurve finden, d.h. ein Intervall $[a, b]$ ist vorgegeben und wir wollen $u_{[a,b]}$ approximieren. Dabei interessieren wir uns für den Fehler F am Ende dieses Intervalls, d.h. die Differenz zwischen $u(b)$ und der Approximation nach n Schritten der Schrittweite $(b - a)/n$.

Der vorige Satz besagt, dass auf einem hypothetischen Computer, der überhaupt keine Rundungsfehler macht, im Wesentlichen folgende Abschätzung für diesen Fehler F gilt: $F(h) \leq c_1 h^4$ mit geeignetem c_1 .

In der Praxis macht ein Computer aber in jedem Schritt Rundungsfehler, so dass in n Schritten dadurch ein Fehler $c'n$ zustande kommt. Deswegen haben wir für den globalen Diskretisierungsfehler die Abschätzung

$$F(h) \leq c_1 h^4 + \frac{c_2}{h}.$$

Insbesondere wird die Approximation im Allgemeinen *nicht* beliebig gut, wenn $h \rightarrow 0$ geht, sondern möglicherweise irgendwann schlechter. Dieses Verhalten kann man tatsächlich beobachten. Z.B. ist für das Anfangswertproblem

$$\dot{u} = -2tu^2, \quad u(0) = 1$$

der Fehler an der Stelle $t = 2$ bei $n = 2^k$ Schritten monoton fallend für $k \in \{1, 2, \dots, 13\}$ und danach zunächst steigend in k ; bei 2^{25} Schritten ist der Fehler ca. 100mal so groß wie bei 2^{13} Schritten. Siehe [3] für mehr Details.

Bemerkung 4.3.12 Verfahren, die in der Praxis Verwendung finden, benutzen eine Schrittweitensteuerung (Verfahren von Runge-Kutta-Fehlberg). Damit läßt sich der Aufwand reduzieren. Der im Matlab-Paket integrierte Löser für gewöhnliche Differentialgleichungen beruht auf dem Runge-Kutta-Fehlberg-Verfahren.

4.4 Aufgaben

Aufgabe 4.4.1 Man schreibe die Differentialgleichung

$$\begin{aligned}\dot{u}_1 &= -u_2 \\ \dot{u}_2 &= u_1\end{aligned}$$

in Polarkoordinaten und löse die Gleichung.

Aufgabe 4.4.2 Man schreibe Matlab-Programme die die Gleichung aus Aufgabe 4.4.1 für einen oder mehrere Anfangswerte $u_0 \neq 0$ nach dem Euler'schen Polygonzugverfahren und dem Verfahren von Runge-Kutta lösen. Man wähle verschiedene Schrittweiten und interpretiere das Ergebnis.

Aufgabe 4.4.3 Man schreibe ein Matlab-Programm das die Gleichung

$$\begin{aligned}\dot{u}_1 &= -u_1 \\ \dot{u}_2 &= -au_2\end{aligned}$$

für die Werte $a = 1, 10, 100, 1000$ und $h = 10^{-2}$ für Anfangswerte auf der Winkelhalbierenden nach dem Euler'schen Polygonzugverfahren löst. Wie sehen die exakten Lösungen aus? wie sieht dies beim impliziten Euler Verfahren aus?

Aufgabe 4.4.4 Man untersuche die logistische Gleichung mit dem Euler'schen Polygonzugverfahren.

Aufgabe 4.4.5 (a) Eine Teilmenge $G \subset \mathbb{R}$ heißt **abgeschlossene Untergruppe** von \mathbb{R} , wenn G eine abgeschlossene Teilmenge und gleichzeitig, bezüglich der Addition, eine Untergruppe ist. Man beschreibe alle abgeschlossenen Untergruppen von \mathbb{R} .

(b) Gegeben sei eine stetige Funktion $x : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Eine Zahl $T \in \mathbb{R}$ heißt Periode von x , wenn für alle $t \in \mathbb{R}$ gilt $x(t + T) = x(t)$. Man zeige, die Menge

$$P_x = \{T \in \mathbb{R} \mid T \text{ ist Periode von } x\}$$

ist eine abgeschlossene Untergruppe von \mathbb{R} .

(c) Man zeige, gibt es für die Lösung $u(t, t_0, u_0)$ des autonomen Anfangswertproblems

$$\dot{u} = f(u), \quad u(t_0) = u_0$$

zwei verschiedene Zeitpunkte t_1, t_2 mit $u(t_1, t_0, u_0) = u(t_2, t_0, u_0)$, so existiert die Lösung für alle $t \in \mathbb{R}$ und ist periodisch, d.h. es existiert eine Zahl $T > 0$ mit $u(t + T, t_0, u_0) = u(t, t_0, u_0)$.

Kapitel 5

Anfänge einer geometrischen Theorie

5.1 Autonome Systeme

Jetzt wollen wir beginnen, geometrische Begriffe für die Lösung und das Langzeitverhalten einzuführen. Wir beginnen mit der Gleichung

$$(5.1.1) \quad \dot{u} = f(u),$$

wobei $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine auf der offenen Menge $U \subset \mathbb{R}^n$ Lipschitz-stetige Funktion sei. Wir setzen voraus, dass die Lösungen $u(t, u_0)$ mit $u_0 \in U$ für alle $t \in \mathbb{R}$ definiert sind. (O.B.d.A. ist $t_0 = 0$, da die Gleichung als autonom vorausgesetzt ist.)

Definition 5.1.2 Eine Abbildung $\varphi : U \times \mathbb{R} \rightarrow U$ heißt Fluss oder Phasenfluss von (5.1.1), falls für jedes $u_0 \in U$ gilt

$$\varphi(u_0, t) = u(t, u_0).$$

Notation: Für $\varphi(u_0, t)$ schreiben wir auch $\varphi_t(u_0)$. Wir erhalten also für alle $t \in \mathbb{R}$ eine Abbildung $\varphi_t(\cdot) : U \rightarrow U$.

Lemma 5.1.3 (Eigenschaften eines Flusses) Ist f in (5.1.1) Lipschitz-stetig und ist φ der zur Gleichung (5.1.1) gehörende Fluss, so gilt

1. $\varphi(\cdot, t) : U \rightarrow U$ ist ein Homöomorphismus. Ist f differenzierbar, so ist $\varphi(\cdot, t)$ ein Diffeomorphismus. Ist f k -mal stetig differenzierbar, so ist $\varphi(\cdot, t)$ ein C^k -Diffeomorphismus (d.h. $\varphi(\cdot, t)$ und $\varphi(\cdot, t)^{-1}$ sind k -mal stetig differenzierbar).
2. $\varphi(u, t + s) = \varphi(\varphi(u, s), t)$.
3. $\varphi(u, 0) = u \forall u \in U$.

Beweis. Die erste Aussage folgt, da $u(t, u_0)$ stetig vom Anfangswert abhängt. Ist f differenzierbar, so ist die Lösung nach dem Anfangswert differenzierbar. Die zweite Aussage ist eine direkte Konsequenz des Eindeutigkeitsatzes. Als direkte Folgerung aus der Definition erhalten wir auch die letzte Aussage. \square

Definition 5.1.4 Sei $u(t, t_0, u_0)$ die Lösung der Differentialgleichung (2.1.2), d.h. $\dot{u} = f(u, t)$ mit maximalem Existenzintervall I . Dann nennt man die Menge $T = \{(u(t, t_0, u_0), t) \mid t \in I\}$ die Trajektorie der Lösung $u(t, t_0, u_0)$. Ein **Pfad** oder auch **Orbit** ist die Projektion einer Trajektorie auf die erste Komponente.

Offensichtlich ist für eine autonome Differentialgleichung der Unterschied zwischen dem Pfad oder Orbit auf der einen Seite und der Trajektorie nicht besonders wichtig.

Lemma 5.1.5 (Trajektorien im erweiterten Phasenraum) Jeder Punkt (u_0, t_0) liegt auf genau einer Trajektorie.

Beweis. Folgt sofort aus den Existenz- und Eindeutigkeitsätzen. \square

Bemerkung 5.1.6 Daraus wird klar, dass der erweiterte Phasenraum eine disjunkte Vereinigung von Trajektorien ist. Ebenso folgt, dass der Phasenraum einer autonomen Gleichung eine disjunkte Vereinigung von Orbits ist. Man überlege sich dies!

Definition 5.1.7 Besteht ein Orbit einer Differentialgleichung aus einem einzigen Punkt u_0 , so nennt man u_0 eine **Ruhelage** von (2.1.2), bzw. ein **Equilibrium** oder auch eine **Gleichgewichtslage**. Eine Gleichgewichtslage einer autonomen Differentialgleichung nennt man auch einen **kritischen Punkt**, alle anderen Punkte werden als **reguläre Punkte** bezeichnet.

Definition 5.1.8 Sei $[a, b] \subset \mathbb{R}$ ein Intervall. Eine stetige Abbildung $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ heißt **Weg** (im \mathbb{R}^n) oder auch **Kurve**. Dann nennt man $\gamma(a)$ den **Anfangspunkt** und $\gamma(b)$ den **Endpunkt**.

Definition 5.1.9 Ist γ ein Homöomorphismus auf dem Intervall (a, b) oder $[a, b]$, so bezeichnet man das Bild $\{\gamma(t) \mid t \in (a, b)\}$ oder $\{\gamma(t) \mid t \in [a, b]\}$ als **Bogen**.

Definition 5.1.10 Sei $S^1 = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}$. Ist $\gamma : S^1 \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein Homöomorphismus, so wollen wir das Bild von γ als **Jordan Bogen**¹ bezeichnen. Ist ein Orbit \mathcal{O} einer autonomen Gleichung ein Jordan Bogen, so nennt man \mathcal{O} auch einen **geschlossenen Orbit**.

Lemma 5.1.11 Ein Orbit \mathcal{O} ist genau dann geschlossen, wenn er der Orbit einer nichtkonstanten periodischen Lösung ist.

Beweis. Zunächst nehmen wir an, dass \mathcal{O} geschlossen ist. Sei $u_0 \in \mathcal{O}$ ein Punkt auf diesem Orbit. Dann gibt es aber ein $T > 0$ mit $u(T, u_0) = u(0, u_0) = u_0$. Die Lösung $u(t, u_0)$ ist dann periodisch mit Periode T . Für die Umkehrung nehmen wir an, dass $u(t, u_0)$ eine periodische Lösung mit (minimaler) Periode T sei. Dann ist $\{u(t, u_0) \mid t \in [0, T)\}$ ein Bogen im \mathbb{R}^n . Identifiziert man im Intervall $[0, T]$ Anfangs- und Endpunkt, so ist dies homöomorph zu S^1 . \square

¹Marie Ennemond Camille Jordan (5.1.1838-22.1.1922) stammte aus Lyon und studierte auch dort. Später wurde er zunächst Prüfer und später Professor an der Ecôle Polytechnique. Er arbeitete in verschiedenen Gebieten der Mathematik, unter anderem auf dem Gebiet "Analysis situs", das wir heute als Topologie bezeichnen.

Definition 5.1.12 Sei $\dot{u} = f(u)$ eine autonome Differentialgleichung, mit $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ Lipschitz-stetig, wobei $U \subset \mathbb{R}^n$ eine offene Teilmenge ist. Eine Teilmenge $V \subset U$ heißt **invariant**, wenn

$$(5.1.13) \quad u_0 \in W \implies u(t, u_0) \in W \quad \forall t \in \mathbb{R},$$

oder anders ausgedrückt, falls

$$(5.1.14) \quad \varphi_t V \subset V \quad \forall t \in \mathbb{R}$$

gilt. Entsprechend heißt die Menge V **positiv invariant** wenn die Bedingung (5.1.13) oder (5.1.14), für alle $u_0 \in V$ und für alle $t > 0$ erfüllt ist. Gleichmaßen nennen wir V **negativ invariant**, wenn eine der Bedingungen ((5.1.13) oder (5.1.14)) für alle $t < 0$ erfüllt ist.

Beispiele invarianter Mengen sind Orbits (von Lösungen, die für alle Zeiten definiert sind). Natürlich sind auch beliebige Vereinigungen von Orbits invariante Mengen. Alle invarianten Mengen sind von dieser Gestalt. Trotzdem ist es interessant, spezielle invariante Mengen zu studieren. Wir beginnen mit folgender Definition.

Definition 5.1.15 Sei \mathcal{O} ein Orbit einer autonomen Differentialgleichung. Mit $\mathcal{O}_{u_0}^+$ bezeichnen wir den **positiven Halborbit** durch $u_0 \in \mathcal{O}$, der für $u_0 \in \mathcal{O}$ definiert ist durch

$$\mathcal{O}_{u_0}^+ = \{u(t, u_0) \mid t \geq 0\}.$$

Entsprechend ist der **negative Halborbit** durch die Gleichung

$$\mathcal{O}_{u_0}^- = \{u(t, u_0) \mid t \leq 0\}.$$

definiert.

Definition 5.1.16 Sei \mathcal{O} ein Orbit einer autonomen Differentialgleichung und $u(t)$ eine zugehörige Lösung. Mit $\omega(\mathcal{O})$ bezeichnen wir die **ω -Limesmenge** von \mathcal{O} . Diese wird definiert als die Menge der Punkte $v \in \mathbb{R}^n$, zu denen eine Folge $\{t_\nu\}_{\nu \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}, t_\nu \rightarrow \infty$ existiert mit $u(t_\nu) \rightarrow v$. Entsprechend definiert man die **α -Limesmenge** $\alpha(\mathcal{O})$ als die Menge der Punkte $w \in \mathbb{R}^n$, zu denen eine Folge $\{t_\nu\}_{\nu \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}, t_\nu \rightarrow -\infty$ existiert mit $u(t_\nu) \rightarrow w$. Als Synonym für Limesmenge gebrauchen wir oft den Begriff **Grenzmenge**.

Lemma 5.1.17 Die vorstehenden Definitionen hängen nicht von der Wahl der Lösung im Orbit \mathcal{O} ab.

Beweis. Zwei Lösungen im selben Orbit gehen durch eine Verschiebung auseinander hervor. Gibt es zu $v \in \mathbb{R}^n$ eine Zeitfolge, so dass $u(t_\nu)$ gegen v konvergiert, so konvergiert eine Lösung \tilde{u} die durch eine Zeitverschiebung aus u hervorgeht, d.h. $\tilde{u}(t) = u(t - \tau)$ für die um τ verschobene Zeitfolge gegen v . \square

Lemma 5.1.18 (Alternative Charakterisierung der Limesmengen) Sei \mathcal{O} ein Orbit einer autonomen Differentialgleichung. Dann ist

$$\omega(\mathcal{O}) = \bigcap_{u \in \mathcal{O}} \overline{\mathcal{O}_u^+}$$

und

$$\alpha(\mathcal{O}) = \bigcap_{u \in \mathcal{O}} \overline{\mathcal{O}_u^-}.$$

Beweis. Einfach nachzuprüfen! □

Definition 5.1.19 Für $u_0 \in U$ sei $\omega(u_0)$ die ω -Limesmenge des eindeutig bestimmten Orbits auf dem u_0 liegt. Entsprechend ist $\alpha(u_0)$ die α -Limesmenge des eindeutig bestimmten Orbits von u_0 .

Satz 5.1.20 Die α - bzw. ω -Limesmengen eines Orbits sind beide abgeschlossen und invariant. Ist der Halborbit \mathcal{O}_u^+ (oder \mathcal{O}_u^-) beschränkt, so gilt: Die ω -Limesmenge (bzw. die α -Limesmenge) ist

1. nichtleer,
2. kompakt und
3. zusammenhängend.

Außerdem wird dann der Abstand einer Lösung im Orbit zur Grenzmenge beliebig klein, d.h.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \text{dist}(u(t, u_0), \omega(u_0)) = 0$$

bzw.

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} \text{dist}(u(t, u_0), \alpha(u_0)) = 0.$$

Beweis. Wegen der alternativen Charakterisierung der Grenzmengen im Lemma 5.1.18 ist eine Limesmenge ein Durchschnitt abgeschlossener Mengen und somit abgeschlossen. Die Invarianz läßt sich für beide Grenzmengen in ganz ähnlicher Weise zeigen, deshalb beschränken wir uns auf die ω -Limesmenge. Sei $v \in \omega(\mathcal{O})$. Sei weiterhin u eine Lösung im Orbit \mathcal{O} . Wie üblich schreiben wir $u(t, v)$ für die Lösung des Anfangswertproblems $\dot{u} = f(u)$, $u(0) = v$. Nun gibt es eine Folge $\{t_k\}_{k \in \mathbb{N}}$, so dass $\lim_{k \rightarrow \infty} u(t_k) = v$ ist. Sei $t \in \mathbb{R}$ fest. Wir behaupten, dass die Folge $u(t + t_k)$ für $k \rightarrow \infty$ gegen $u(t, v)$ konvergiert. Dazu sei $\varepsilon > 0$. Dazu existiert (nach Satz 2.2.12) ein $\delta > 0$ mit der Eigenschaft, dass $|v - u_0| < \delta \Rightarrow |u(t, v) - u(t, u_0)| \leq \varepsilon$. Weiter gibt es zu $\delta > 0$ ein $N \in \mathbb{N}$ mit $k > N \Rightarrow |u(t_k) - v| < \delta$. Dann ist aber für $k > N$ wegen $u(t, u(t_k)) = u(t + t_k)$ auch $|u(t + t_k) - u(t, v)| < \varepsilon$. Insbesondere ist $u(t, u_0)$ der Grenzwert der $u(t + t_k)$ und

deshalb in $\omega(\mathcal{O})$.

Für die zweite Behauptung beschränken wir uns wieder auf den positiven Halborbit, für den negativen Halborbit geht der Beweis ganz genauso. Sei also $u \in \mathcal{O}$ und \mathcal{O}_u^+ beschränkt. Dann schließt man zunächst, dass für $u \in \mathcal{O}$ der Abschluss $\overline{\mathcal{O}_u^+}$ des positiven Halborbites nichtleer und kompakt ist. Da offensichtlich je endlich viele der $\overline{\mathcal{O}_u^+}$ nichtleeren Durchschnitt haben, also je endlich viele $\overline{\mathcal{O}_{u_j}^+}$, $u_j \in \mathcal{O}$, nichtleeren Schnitt haben, ist auch der Schnitt

$$\bigcap_{u \in \mathcal{O}} \overline{\mathcal{O}_u^+}$$

nichtleer und natürlich kompakt (man beachte die endliche Durchschnittseigenschaft als Charakterisierung kompakter Mengen.). Der Zusammenhang der Limesmenge folgt unmittelbar (wie?) aus der Konvergenzeigenschaft, die wir zunächst beweisen. Angenommen wir hätten eine Folge $t_k \rightarrow \infty$ mit $\text{dist}(u(t_k, u_0), \omega(u_0))$ konvergiert nicht gegen null. Durch Auswahl einer Teilfolge, die wieder mit t_k bezeichnet wird, kann man davon ausgehen, dass

$$\text{dist}(u(t_k, u_0), \omega(u_0)) > \eta \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

für eine Zahl $\eta > 0$ gilt. Wegen der Beschränktheit des Semiorbits erhält man eine konvergente Teilfolge, deren Grenzelement natürlich in der Grenzmenge $\omega(u_0)$ enthalten ist. Damit haben wir einen Widerspruch. \square

Der folgende Satz beschreibt das Verhalten der Lösungen in der Nähe eines regulären Punktes.

Satz 5.1.21 (Begradigungssatz) *Sei u_0 ein regulärer Punkt der autonomen Differentialgleichung (5.1.1), wobei f als Lipschitz-stetig vorausgesetzt wird. Dann gibt es Umgebungen W von u_0 und V von 0 im \mathbb{R}^n und einen Homöomorphismus $\Psi : W \rightarrow V$ welcher die Orbits der Gleichung (5.1.1) auf die Orbits der Gleichung*

$$(5.1.22) \quad \dot{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

im folgenden Sinne abbildet: Sei $u(t, w_0)$ eine Lösung in W , so ist

$$v(t, \Psi(w_0)) = \Psi(u(t, w_0))$$

Lösung des Anfangswertproblems (5.1.22) und $v(0, \Psi(w_0)) = \Psi(w_0)$. Dabei kann V in der Form $(-a, a) \times B_\delta^{n-1}(0)$ für ein $a > 0$ und

$$B_\delta^{n-1} = \{(x_2, \dots, x_n) \mid |(x_2, \dots, x_n)| < \delta\}$$

gewählt werden. Ist f differenzierbar, so kann Ψ als Diffeomorphismus gewählt werden.

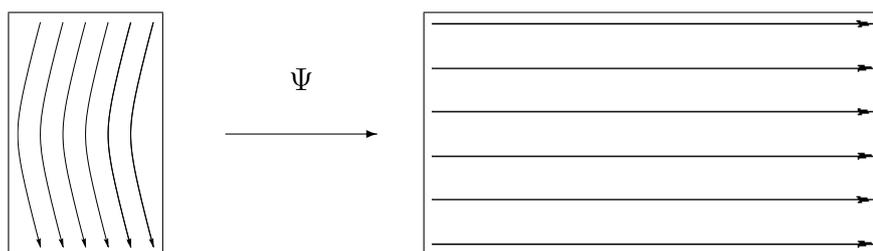


Abbildung 5.1: Begradigung des Vektorfeldes

Die Abbildung 5.1 zeigt das begradigte Vektorfeld und den begradigenden Homöomorphismus.

Beweis. Übungsaufgabe! □

Bemerkung 5.1.23 Dies ist der erste Satz, der sozusagen eine **Normalform** einer Differentialgleichung angibt. Eine allgemeine Normalform in der Nähe singulärer Punkte gibt es nicht. Unter zusätzlichen Voraussetzungen kann man solche Normalformen angeben. Dabei untersucht man das Spektrum der Linearisierung des Vektorfeldes in der Ruhelage. Das Auffinden von Normalformen in der Nähe der kritischer Punkte von autonomen Differentialgleichungen ist heute eine wichtige Aufgabe der Theorie der Differentialgleichungen. Solche (einfache) Gleichungen, die das Verhalten in der Nähe solcher Punkte dann beschreiben, sind unter sehr allgemeinen Voraussetzungen bekannt.

Definition 5.1.24 Das Urbild $\Psi^{-1}(0 \times B_\delta^{n-1})$ heißt **Transversale** zu f im Punkt u_0 .

Definition 5.1.25 Eine Teilmenge M von U heißt **minimal**, wenn sie nichtleer, kompakt und invariant ist und keine echte Teilmenge mit diesen Eigenschaften enthält.

Satz 5.1.26 (Existenz minimaler Mengen) Jede nichtleere, kompakte und invariante Menge M enthält eine minimale Menge.

Beweis. Sei F die Familie der nichtleeren, kompakten und invarianten Teilmengen von M . Da $M \in F$ ist $F \neq \emptyset$. Wir definieren eine Ordnung auf F , indem wir setzen $M_1 > M_2$ genau dann wenn $M_1 \subset M_2$. Hat man nun eine vollständig geordnete Kette K bezüglich dieser Ordnung, so gilt für jede endliche Auswahl M_1, \dots, M_n , dass $\bigcap_{j=1}^n M_j \neq \emptyset$. Also ist $M_K = \bigcap_{M \in K} M$ nichtleer, kompakt und invariant. Also existiert eine obere Schranke in F . Das Zornsche Lemma garantiert nun die Existenz eines maximalen Elementes. Dies hat alle gewünschten Eigenschaften. □

Definition 5.1.27 Eine nichtleere, kompakte und invariante Menge $K \subset U$ heißt **stabil**, wenn es zu jeder Umgebung W von K mit $K \subset W \subset U$ eine weitere Umgebung V von K , $V \subset W$ gibt, so dass

$$u_0 \in V \implies u(t, u_0) \in W \quad \forall t \geq 0$$

gilt.

Definition 5.1.28 Eine Teilmenge $\mathcal{A} \subset U$ wird **Attraktor** genannt, wenn \mathcal{A} stabil ist und es eine Umgebung S von \mathcal{A} gibt, so dass

$$u_0 \in S \implies \text{dist}(u(t, u_0), \mathcal{A}) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0$$

gilt.

Eine wichtige Aufgabe der qualitativen Theorie von Differentialgleichungen besteht darin, die Attraktoren zu finden und die Feinstruktur des Phasenflusses auf den Attraktoren. Erst in den letzten Jahren haben seltsame Attraktoren (Lorentz Attraktor) und chaotische Systeme viel Aufmerksamkeit auf sich gelenkt. Auch in der Theorie unendlich dimensionaler dynamischer Systeme spielen *globale Attraktoren* eine wichtige Rolle. Unter sehr allgemeinen Umständen sind diese endlich dimensional, und das Verhalten auf dem Attraktor und nahe bei dem Attraktor kann wieder durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschrieben werden.

5.2 Der Satz von Poincaré-Bendixson

Im vorigen Abschnitt haben wir Existenz und einige Eigenschaften von Limesmengen kennengelernt. Hier wollen wir einen Satz vorstellen, der zu Beginn des 20. Jahrhunderts bewiesen wurde und der nach dem schwedischen Mathematiker Ivar Otto Bendixson² und dem französischen Mathematiker Jules Henri Poincaré³ benannt ist. Der Satz, mit dem wir uns nun beschäftigen wollen, wurde vor kurzem wiederbelebt, indem eine Verallgemeinerung für bestimmte partielle Differentialgleichungen und auch für sogenannte Funktionaldifferentialgleichungen entdeckt wurde. Zuerst noch ein wichtiges Hilfsmittel, der sogenannte Jordan'sche Kurvensatz.

Satz 5.2.1 (Jordan) Jeder Jordan Bogen zerlegt den \mathbb{R}^2 in zwei Komponenten, von denen genau eine beschränkt ist.

Beweis. s. Deimling [10]. □

Satz 5.2.2 (Poincaré-Bendixson) Sei $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ Lipschitz-stetig, $\dot{u} = f(u)$ eine autonome Differentialgleichung im \mathbb{R}^2 und $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$ eine Lösung. Sei $u_0 \in \{u(t) \mid t \in \mathbb{R}\}$. Ist

1. $\mathcal{O}_{u_0}^+$ beschränkt, so enthält $\omega(u_0)$ entweder eine Ruhelage oder einen periodischen Orbit,

²Ivar Otto Bendixson (1.8.1861-29.11.1935) forschte und lehrte an der Universität Stockholm. Er befaßte sich mit algebraischen Fragen (Auflösung von Gleichungen) wie auch mit Differentialgleichungen

³Jules Henri Poincaré (29.4.1854-17.7.1912) war ein Zeitgenosse Hilberts und gilt als einer der bedeutendsten Mathematiker seiner Zeit, wie auch dieses Jahrhunderts. Er führte topologische Methoden bei der Untersuchung analytischer Probleme ein und wurde damit auch zu einem der Mitbegründer der algebraischen Topologie.

2. $\mathcal{O}_{u_0}^-$ beschränkt, so enthält $\alpha(u_0)$ entweder eine Ruhelage oder einen periodischen Orbit.
3. Sind sowohl $\mathcal{O}_{u_0}^+$, wie auch $\mathcal{O}_{u_0}^-$ beschränkt, so enthalten beide Grenzmengen jeweils entweder eine Ruhelage oder einen periodischen Orbit.

Beweis. Die Beweise sind für die beiden Grenzmengen identisch, wir führen deshalb nur den Beweis für die ω -Limesmenge aus. Sei $U_0 \in \omega(u_0)$ ein regulärer Punkt. Wegen der Invarianz von Grenzmengen ist auch der Orbit durch U_0 wieder in $\omega(u_0)$ und natürlich dann auch dessen Grenzmenge. Dies sieht man ein, indem man annimmt, dass U_1 ein Punkt in der Grenzmenge $\omega(U_0)$ ist. Dann gibt es eine Folge $t_n \rightarrow \infty$, so dass $u(t_n, U_0)$ gegen U_1 konvergiert. Für jedes n existiert eine Folge $t_{n_k} \rightarrow \infty$ für $k \rightarrow \infty$ mit $u(t_{n_k}, u_0) \rightarrow u(t_n, U_0)$ für $k \rightarrow \infty$. Dann gibt es eine Folge, $t_{n_{k_j}}$, so dass $u(t_{n_{k_j}}, u_0)$ gegen U_1 konvergiert. Man führe das Argument aus. Wir wollen zeigen, dass entweder der Orbit \mathcal{O} durch U_0 geschlossen ist, oder die Grenzmenge von \mathcal{O} aus Ruhelagen besteht. Die weiteren Schritte des Beweises wollen wir in einige Lemmata aufgliedern. Der Beweis beruht auf dem Existenzsatz für minimale Mengen und ist demzufolge nicht konstruktiv.

Lemma 5.2.3 Sei w_0 ein regulärer Punkt und L eine abgeschlossene Transversale zu f in w_0 . D.h. L ist eine Transversale, die durch eine Abbildung γ beschrieben wird, deren Definitionsbereich ein abgeschlossenes Intervall $I = [a, b]$ ist. Sei $L_0 = \gamma(\text{int}(I))$. Sei $V \subset L_0$ definiert durch

$$V = \{w \in L_0 \mid \exists t_w > 0 : u(t_w, w) \in L_0 \text{ und } u(t, w) \notin L \forall t \in (0, t_w)\}.$$

Sei $W = \gamma^{-1}(V) \subset I$ und $g : W \rightarrow I$ definiert durch

$$g(y) = \gamma^{-1}u(t_{\gamma(y)}, \gamma(y)).$$

Dann ist

1. W offen;
2. g stetig;
3. $g^k(w)$ ist monoton, wobei $g^k(w) = g(g^{k-1}(w))$, solange es definiert ist.

Beweis. Wegen der stetigen Abhängigkeit und der Tatsache, dass L Transversale ist, folgt, dass W offen ist. Ebenso erhält man die Stetigkeit von g . Nun betrachten wir den Jordan Bogen, der für einen Punkt $w \in V$ aus $\{u(t, w) \mid t \in [0, t_w]\}$ und dem Abschnitt in L_0 zwischen w und $u(t_w, w)$ besteht. Ist $w = u(t_w, w)$, so ist diese Lösung periodisch und damit ist für $y \in \gamma^{-1}(w)$, also $g^k(y) = y$ für alle $k \in \mathbb{N}$. Angenommen, es ist $g^k(y) > g^{k-1}(y)$ und $g^k(y) \in W$. Dieser Jordan Bogen zerlegt die Ebene in ein beschränktes Gebiet G_b und ein unbeschränktes Gebiet G_u . Da L Transversale ist, können Lösungen diese nur in eine Richtung überqueren. Betrachte $\gamma([g^k(y), b])$. Dieses Stück der Transversale liegt entweder in G_b oder in G_u . Sonst müsste ein Orbit den Abschnitt zwischen w und $u(t_w, w)$ in anderer Richtung queren als der Orbit durch $\gamma^{-1}(g^k(w))$. Demzufolge liegt, falls $g^{k+1}(w)$ definiert ist, dieses auch in $[g^k(w), 1]$. Damit ist per Induktion dieses Lemma gezeigt. \square

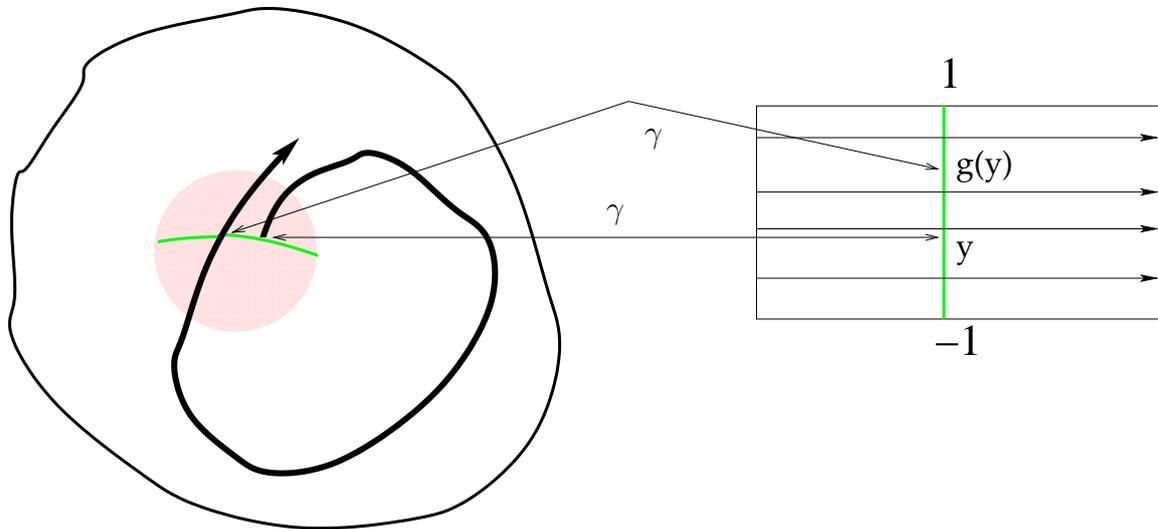


Abbildung 5.2: Konstruktion von g

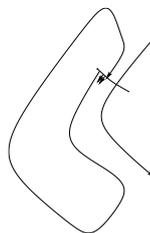


Abbildung 5.3: Transversale und Jordan Bogen

Korollar 5.2.4 Die ω -Limesmenge eines Orbits kann L_0 (das Innere einer Transversale) in höchstens einem Punkt schneiden. Ist $w_0 \in \omega(\mathcal{O}) \cap L_0$, so ist entweder $\omega(\mathcal{O}) = \mathcal{O}$, also \mathcal{O} geschlossen, oder zu einer Lösung $u(t)$ in \mathcal{O} existiert eine Zeitfolge $t_n \rightarrow \infty$ mit $u(t_n) \in L_0$ und $u(t_n) \rightarrow w_0$ (monoton, wie zuvor).

Beweis. Seien W, V, Ψ wie im Begründungssatz 5.1.21. Da w_0 Limes einer Folge $u(t_n, u_0)$ ist, gibt es zu jeder Umgebung von w_0 unendlich viele der Punkte $u(t_n, u_0)$. Sei $B_\varepsilon(w_0)$ eine Kugel um w_0 , die vollständig in der Umgebung W enthalten ist. Da jede Lösung mit Anfangswert in $B_\varepsilon(w_0)$ sowohl die Umgebung W verläßt, wie auch die Transversale schneiden muss, hat man unendlich viele Schnittpunkte mit L_0 , falls $\mathcal{O}_{u_0} \cap \mathcal{O}_{w_0} = \emptyset$. Seien nun $u(t^n, u_0)$ die Schnittpunkte der Lösung u mit L_0 . Wegen des vorhergehenden Lemmas hat man die monotone Konvergenz. Daraus folgt auch die Eindeutigkeit. \square

Korollar 5.2.5 Falls der positive Halborbit \mathcal{O}_u^+ und $\omega(\mathcal{O}_u^+)$ einen gemeinsamen Punkt haben, so ist \mathcal{O} geschlossen.

Beweis. Ist $u_0 \in \mathcal{O}_u^+ \cap \omega(\mathcal{O}_u^+)$, so existiert eine Transversale zu f durch u_0 . Wäre $\omega(\mathcal{O}_u^+) \neq \mathcal{O}$, so gäbe es eine Folge $t_k \rightarrow_{k \rightarrow \infty} \infty$ mit $u(t_k) \in L_0$ und $u(t_k) \rightarrow u_0$ (monoton). Da u_0 in \mathcal{O}_u^+ liegt, widerspricht dies der monotonen Konvergenz. Damit folgt der Satz aus Korollar 5.2.4. \square

Lemma 5.2.6 Ist M eine beschränkte minimale Menge, so ist M entweder eine periodische Lösung oder eine Ruhelage.

Beweis. Jeder Orbit in M hat nichtleere Grenzmengen (wegen der Beschränktheit von M). Diese sind kompakt und invariant. Da M minimal ist, fallen sie mit dem Orbit zusammen:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha(\mathcal{O}) \subset M \\ \omega(\mathcal{O}) \subset M \end{array} \right\} M \text{ minimal} \Rightarrow \alpha(\mathcal{O}) = M = \omega(\mathcal{O}).$$

Daher ist $\mathcal{O} \subset \omega(\mathcal{O})$. Entweder M enthält einen regulären Punkt, dann ist der zugehörige Orbit periodisch. Im anderen Fall besteht M aus einer einzigen Ruhelage. \square

Nun folgt der Satz von Poincaré-Bendixson unmittelbar: Die ω -Limesmenge ist nicht-leer, kompakt und invariant und enthält demzufolge eine minimale Menge. Diese hat die gewünschte Gestalt.

Wir wollen noch etwas mehr zeigen, nämlich dass die Limesmenge einer Lösung im Orbit selbst schon (fast) minimal ist. Dies ergibt einen zweiten Beweis, der nicht auf dem Zorn'schen Lemma beruht.

Lemma 5.2.7 Sei \mathcal{O}_{U_0} ein Orbit in der Grenzmenge $\omega(u_0)$. Ist w_0 ein regulärer Punkt in \mathcal{O}_{U_0} , so hat man folgende Alternative:

1. $\omega(\mathcal{O}_{w_0})$ enthält einen geschlossenen Orbit \mathcal{O}_1 . Dann ist $\mathcal{O}_1 = \mathcal{O}_{w_0}$.

2. $\omega(\mathcal{O}_{w_0})$ enthält keinen regulären Punkt.

Beweis. Angenommen v_0 ist ein regulärer Punkt in \mathcal{O}_{w_0} . Wir müssen zeigen, dass erstens der Orbit \mathcal{O}_{v_0} geschlossen ist und zweitens mit dem Orbit \mathcal{O}_{w_0} zusammenfällt. Sei L eine abgeschlossene Transversale zu f in v_0 mit Innerem L_0 . Dann kann $u(t, w_0)$ die Transversale L_0 wegen Korollar 5.2.4 in höchstens einem Punkt schneiden. Andererseits gibt es eine Folge $t_k \rightarrow_{k \rightarrow \infty} \infty$, so dass $u(t_k) \rightarrow w_0$ konvergiert. Wegen des Begradigungssatzes schneidet jede Lösung, die dem Punkt v_0 nahe kommt auch die Transversale in einem Punkt nahe v_0 . Also gibt es ein k_0 , so dass aus $k > k_0$ folgt $u(t_k) = v_0$. Damit ist $u(t)$ periodisch und es folgt die erste Aussage. \square

Wir bemerken, dass die zweite Möglichkeit noch genauer formuliert werden kann, entweder $\omega(\mathcal{O}_{w_0})$ besteht aus einer Ruhelage oder unendlich vielen. Dies folgt u.a. aus dem nächsten Korollar, mit dem man genauere Aussagen über die Struktur der Grenzengen macht. Wir fassen diese in der folgenden Aussage zusammen.

Korollar 5.2.8 (Struktur der Grenzengen) Sei f wie im Satz und habe in U nur endlich viele kritische Punkte. Es sei u eine halbseitig beschränkte Lösung. Dann besteht die entsprechende Limesmenge entweder aus

1. einer endlichen Anzahl von Ruhelagen \mathbf{U}_ℓ , $\ell = 1, \dots, m$ und m Lösungen u_ℓ , $\ell = 1, \dots, m$ mit $u_\ell(t) \rightarrow_{t \rightarrow -\infty} \mathbf{U}_\ell$ und $u_\ell(t) \rightarrow_{t \rightarrow \infty} \mathbf{U}_{\ell+1(\text{mod } m)}$ und einer nicht bestimmten Zahl von Lösungen $u_{k,\ell}(t, u_0)$ mit $\omega(u_0) = \alpha(u_0) = \mathbf{U}_\ell$, die wir als **Schleifen** bezeichnen wollen, oder
2. einem periodischen Orbit.

Beweis. Dies folgt aus dem Beweis des Satzes 5.2.2. Angenommen, \mathcal{O} ist ein Orbit in $\omega(u_0)$, $u_0 = u(0)$. Entweder dieser korrespondiert zu einer Ruhelage oder einer periodischen Lösung oder er enthält einen regulären Punkt und ist nicht geschlossen. Im zweiten Fall ist der geschlossene Orbit die gesamte Grenzmenge, nach Lemma 5.2.7. Im dritten Fall enthält die Grenzmenge keinen regulären Punkt. Also ist die Grenzmenge in der diskreten Menge der Ruhelagen enthalten und besteht wegen des Zusammenhangs von Grenzengen aus einer einzigen Ruhelage. Auf diese Weise kann man jedem Orbit mit regulären Punkten genau eine Ruhelage in der ω - und eine in der α -Limesmenge zuordnen. Der Satz ist gezeigt, wenn diese Zuordnung injektiv auf einer Teilmenge ist, d.h. eine Teilmenge der Orbits mit regulären Punkten existiert, so dass je zwei verschiedene Orbits verschiedene Grenzengen haben. Dies folgt durch die Betrachtung von Transversalen in verschiedenen regulären Punkten. \square

Korollar 5.2.9 Ist \mathcal{O}^+ ein beschränkter Halborbit und enthält $\omega(\mathcal{O}^+)$ mindestens einen regulären Punkt und genau eine Ruhelage U_0 , so besteht $\omega(\mathcal{O}^+)$ aus mindestens zwei Orbits, nämlich $\{\mathbf{U}_0\}$ und \mathcal{O}_0 mit

$$\alpha(\mathcal{O}_0) = \omega(\mathcal{O}_0) = \{\mathbf{U}_0\}$$

und eventuell weiteren Orbits (Schleifen) wie in Korollar 5.2.8 im Punkt 1.

Definition 5.2.10 (a) Sind U_1, U_2 Ruhelagen und ist $u(t, u_0)$ eine Lösung der Differentialgleichung $\dot{u} = f(u)$ mit $\omega(u_0) = U_2$ und $\alpha(u_0) = U_1$, so nennt man den zugehörigen Orbit einen heteroklinen Orbit. Man spricht auch von einem **verbindenden Orbit** (engl. **connecting orbit**).

(b) Sind in der Definition des Teils (a) die Punkte $U_1 = U_2$ gleich, so wird der in (a) beschriebene Orbit als **homokliner Orbit** bezeichnet.

Bemerkung 5.2.11 Mit dieser Terminologie besteht die ω -Limesmenge einer beschränkten Lösung eines zweidimensionalen autonomen Systems entweder aus einem periodischen Orbit oder entweder aus einer Ruhelage und homoklinen Orbits oder aus endlich vielen Ruhelagen und einer gleichen Anzahl von heteroklinen Orbits und einer unbestimmten Zahl von homoklinen Orbits (falls nur endlich viele kritische Punkte vorhanden sind).

Definition 5.2.12 Eine offene Teilmenge $U \subset \mathbb{R}^2$ heißt **einfach zusammenhängend**, wenn sie homöomorph zum offenen Einheitskreis ist.

Für den Beweis des nächsten Satzes möchte ich ein Ergebnis zitieren, dessen Beweis z.B. in [7] zu finden ist.

Satz 5.2.13 Jede stetige Abbildung des abgeschlossenen Einheitskreises in sich hat einen Fixpunkt.

Satz 5.2.14 Gegeben sei eine Differentialgleichung wie im Satz 5.2.2. Die Menge $U \subset \mathbb{R}^2$ sei einfach zusammenhängend. Dann umschließt jeder periodische Orbit eine Ruhelage.

Bemerkung 5.2.15 Eine periodische Lösung entspricht einem geschlossenen Orbit, dieser wiederum ist eine Jordankurve. Nach dem Jordan'schen Satz zerlegt der Orbit den \mathbb{R}^2 in zwei Komponenten, von denen eine beschränkt ist. Die Aussage des Satzes ist, dass die beschränkte Komponente einen stationären Punkt enthält. Da U einfach zusammenhängend ist, ist auch die beschränkte Komponente einfach zusammenhängend und damit homöomorph zum offenen Einheitskreis. Diese an sich recht anschauliche Behauptung wird in der Funktionentheorie bewiesen.

Beweis. Sei G_b die beschränkte Komponente, die von dem geschlossenen Orbit nach dem Jordan'schen Kurvensatz definiert wird. Weiter sei H deren Abschluß. Zu jedem $\tau > 0$ betrachten wir die Abbildung $\varphi_\tau : H \rightarrow H$. Es ist klar, dass wegen des Eindeutigkeitssatzes die Menge H invariant ist. Da H homöomorph zum abgeschlossenen Einheitskreis ist, hat jede Abbildung φ_τ einen Fixpunkt u_τ . Ist nun $\{\tau_m\}_{m \in \mathbb{N}}$ eine gegen Null konvergierende Folge, und u_m eine Folge von Fixpunkten von φ_{τ_m} , so kann man o.B.d.A. davon ausgehen, dass die Menge u_m gegen u^* konvergiert (nach Übergang zu einer Teilfolge). Zu jedem $t > 0$ und für jedes $m \in \mathbb{N}$ existiert eine Zahl $k_m(t)$ mit der Eigenschaft $k_m(t)\tau_m \leq t < (k_m(t) + 1)\tau_m$. Wir schätzen ab

$$\begin{aligned} |\varphi_t(u^*) - u^*| &\leq |\varphi_t(u^*) - \varphi_t(u_m)| + |\varphi_t(u_m) - u_m| + |u_m - u^*| \\ &= |\varphi_t(u^*) - \varphi_t(u_m)| + |\varphi_{t-k_m(t)\tau_m}(u_m) - u_m| + |u_m - u^*|. \end{aligned}$$

Der erste und der letzte Term werden aufgrund der Konvergenz von $u_m \rightarrow u^*$ und der stetigen Abhängigkeit von Anfangswerten klein. Für den mittleren Ausdruck brauchen wir eine gewisse Gleichmäßigkeit der Konvergenz von $\varphi_t(\cdot) \rightarrow \mathbb{1}$ für $t \rightarrow 0$. Wir umgehen dies mit folgender Abschätzung::

$$|\varphi_{t-k_m(t)\tau_m}(u_m) - u_m| \leq |\varphi_{t-k_m(t)\tau_m}(u_m) - \varphi_{t-k_m(t)\tau_m}(u^*)| + |\varphi_{t-k_m(t)\tau_m}(u^*) - u^*| + |u^* - u_m|$$

Hier wird wieder der erste und der letzte Ausdruck klein, wegen der Konvergenz $u_m \rightarrow u^*$ und der stetigen Abhängigkeit. Der mittlere Ausdruck wird klein, da

$$t - k_m(t)\tau_m \rightarrow 0$$

konvergiert. □

5.3 Das Wazewski-Prinzip

Der Satz von Poincaré-Bendixson gibt eine Art von topologischem Prinzip, um Lösungen bestimmter Art zu garantieren. Wir wollen hier ein weiteres solches Prinzip kennenlernen. Es gehört eigentlich nicht unter die Überschrift „Autonome Gleichungen“, denn wir können hier auch nichtautonome Gleichungen zulassen. Die Anwendungen betreffen jedoch zumeist autonome Probleme, und deshalb ist es vielleicht gerechtfertigt, dieses Prinzip, das den Namen des polnischen Mathematikers Wazewski⁴ trägt, hier im Anschluß an den Satz von Poincaré-Bendixson zu präsentieren. Wir beginnen mit einem Spezialfall einer Definition aus der Topologie.

Definition 5.3.1 Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ eine offene Teilmenge. Eine Menge $V \subset U$ heißt **Retrakt** von U , falls es eine stetige Abbildung $\pi : U \rightarrow V$ gibt mit den Eigenschaften $\pi|_V : V \rightarrow V = \mathbb{1}|_V$. Die Abbildung π wird **Retraktion** genannt.

Beispiel 5.3.2 Jede nichtleere, konvexe und abgeschlossene Teilmenge $V \subset \mathbb{R}^n$ ist ein Retrakt. Es reicht den Fall zu betrachten, dass \mathbb{R}^n der lineare Span von Punkten in V ist. Man wählt einen Punkt x_0 in V und definiert die Abbildung $\pi(x) = x$, falls $x \in V$ und $x_0 + \lambda \frac{x-x_0}{|x-x_0|}$ für x außerhalb V , wobei λ so gewählt ist, dass der Punkt auf ∂V liegt und zwar zwischen x_0 und x .

Ein einfaches Argument zeigt, dass keine nichtleere offene Menge $V \neq \mathbb{R}^n$ Retrakt des \mathbb{R}^n ist.

Der Rand des Einheitskreises ist kein Retrakt der abgeschlossenen Einheitskreisscheibe. Gleiches gilt in höheren Dimensionen. Der Beweis dieser Aussage beruht auf dem Brouwerschen Fixpunktsatz.

Eine nichtzusammenhängende Menge ist kein Retrakt einer zusammenhängenden Menge. Auch dies sollte man sich zur Übung überlegen.

⁴Tadeus Wazewski(24.9.1896-5.9.1972) war wesentlicher Vertreter einer polnischen Schule, die sich topologische Ideen beim Studium von Differentialgleichungen zu Nutze machte. Er litt unter der deutschen Besetzung Polens und wurde für längere Zeit im Konzentrationslager Sachsenhausen interniert.

Definition 5.3.3 Sei $W \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ eine offene Teilmenge und $f : W \rightarrow \mathbb{R}^n$ in der ersten Komponente Lipschitz-stetig. Weiter sei W^0 eine offene Teilmenge von W , ∂W^0 der Rand von W^0 und $\overline{W^0}$ der Abschluß von W^0 . Ein **Austrittspunkt** von W^0 für die Differentialgleichung $\dot{u} = f(u, t)$ ist ein Paar $(u_0, t_0) \in \partial W^0$, so dass ein $\varepsilon > 0$ existiert, so dass $(u(t, t_0, u_0), t)$ für $t \in (t_0 - \varepsilon, t_0)$ in W^0 enthalten ist. Ein Austrittspunkt wird **echter Austrittspunkt** genannt, falls es ein Intervall $(t_0, t_0 + \delta)$ gibt, so dass für $t \in (t_0, t_0 + \delta)$ die Lösung $(u(t, t_0, u_0), t)$ außerhalb von $\overline{W^0}$ ist. Mit W_a^0 bezeichnen wir die Menge der Austrittspunkte, mit W_{sa}^0 die Menge der echten (strikten) Austrittspunkte.

Satz 5.3.4 Sei $f : W \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig und bezüglich der ersten Komponente Lipschitz stetig. Jeder Austrittspunkt einer offenen Teilmenge W^0 von W sei echter Austrittspunkt, d.h. $W_a^0 = W_{sa}^0$. Sei $S \subset W^0 \cup W_a^0$ nichtleer. Angenommen, $S \cap W_a^0$ ist kein Retrakt von S , aber ein Retrakt von W_a^0 . Dann gibt es einen Anfangswert $(u_0, t_0) \in S$, so dass $(u(t, t_0, u_0), t)$ auf dem maximalen (rechtsseitigen) Existenzintervall in W^0 enthalten ist.

Definition 5.3.5 Die in diesem Satz dargestellte Existenzaussage wird als **Wazewski-Prinzip** bezeichnet.

Beweis. Wir beweisen den Satz durch Widerspruch. Unter der Annahme, dass der Satz falsch ist, konstruieren wir eine Retraktion, d.h. eine Abbildung mit gewissen zusätzlichen Eigenschaften von S auf $S \cap W_a^0$. Zu jedem Paar $(u_0, t_0) \in S \cap W^0$ existiert ein $t_1 > t_0$, so dass für $t \in (t_0, t_1)$ die Lösung $(u(t, t_0, u_0), t) \in W^0$ ist, und für t_1 gilt $(u(t_1, t_0, u_0), t_1) \in \partial W^0$. Insbesondere ist $(u(t_1, t_0, u_0), t_1) \in W_a^0$. Wir definieren eine Abbildung $\pi : S \rightarrow W_a^0$ durch $\pi(u_0, t_0) = (u(t_1, t_0, u_0), t_1)$ falls $(u_0, t_0) \notin W_a^0$ und $\pi(u_0, t_0) = (u_0, t_0)$, falls $(u_0, t_0) \in W_a^0$. Jetzt behaupten wir: π ist stetig. Da die Funktion $t \mapsto u(t, t_0, u_0)$ stetig ist, genügt es zu zeigen, dass $t_1 = t_1(u_0, t_0)$ eine stetige Funktion ist. Dies folgt so: Jeder Austrittspunkt ist echter Austrittspunkt. Also ist für beliebig kleine $\varepsilon > 0$ der Punkt $u(t_1 - \varepsilon, t_0, u_0)$ in der offenen Menge W^0 und der Punkt $u(t_1 + \varepsilon, t_0, u_0)$ im Äußeren der geschlossenen Menge $\overline{W^0}$. Gegeben u_0, t_0 , gibt es also für beliebig kleine $\varepsilon > 0$ ein $\delta > 0$, so dass der offene Ball B_i mit Radius δ um $u(t_1 - \varepsilon, t_0, u_0)$ komplett in W^0 liegt und so dass der offene Ball B_a mit Radius δ um $u(t_1 + \varepsilon, t_0, u_0)$ komplett außerhalb von $\overline{W^0}$ liegt. Wegen stetiger Abhängigkeit von Anfangsdaten gilt damit für alle (\hat{t}_0, \hat{u}_0) , die genügend nahe an (t_0, u_0) liegen, dass $u(t_1(t_0, u_0) - \varepsilon, \hat{t}_0, \hat{u}_0)$ in B_i liegt und dass $u(t_1(t_0, u_0) + \varepsilon, \hat{t}_0, \hat{u}_0)$ in B_a liegt. Deswegen liegt $t_1(\hat{t}_0, \hat{u}_0)$ im Intervall $(t_1(t_0, u_0) - \varepsilon, t_1(t_0, u_0) + \varepsilon)$. Damit ist die Stetigkeit von π gezeigt. Sei nun $\tau : W_a^0 \rightarrow S \cap W_a^0$ eine Retraktion. Dann ist $\tau \circ \pi$ eine Retraktion von S auf $S \cap W_a^0$. Dies ist ein Widerspruch zur Voraussetzung.

Bleibt nur noch zu überlegen, warum $S \cap W^0 \neq \emptyset$ ist. Falls dies leer wäre, so wäre $S \subset W_a^0$ und $S \cap W_a^0 = S$ ist ein Retrakt von S im Gegensatz zur Annahme. \square

Beispiel 5.3.6 1.) Wir betrachten zunächst ein nichtautonomes Beispiel. Gegeben sei eine stetige Abbildung $f : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, welche in der ersten Komponente Lipschitz-stetig sei. Wir nehmen an, dass es zwei Zahlen $u_1 < u_2 \in \mathbb{R}$ gibt, so dass für alle $t \in \mathbb{R}$ gilt

$$f(u_1, t) < 0 \text{ und } f(u_2, t) > 0.$$

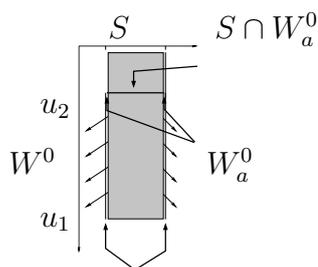


Abbildung 5.4: Wazewski-Prinzip: erstes Beispiel

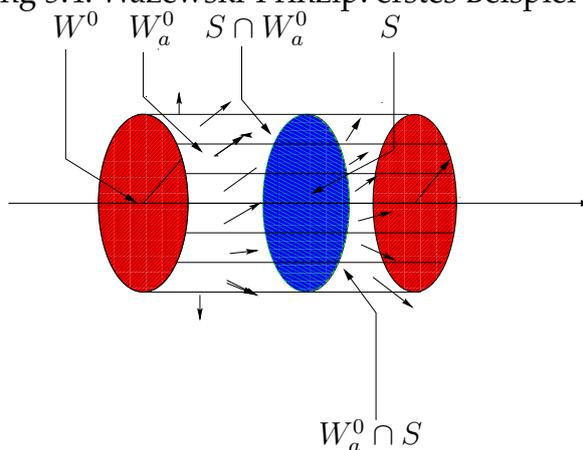


Abbildung 5.5: Das erste Beispiel in höherer Dimension

Dann gibt es eine Lösung $u(t)$ von $\dot{u} = f(u, t)$ mit $u_1 < u(t) < u_2 \forall t \in \mathbb{R}$. Sei

$$W^0 = \{(u, t) \mid u_1 < u < u_2\},$$

siehe Abbildung 5.4. Alle Punkte auf den Geraden $u = u_1$, bzw. $u = u_2$ sind Austrittspunkte, sogar echte Austrittspunkte. Sei

$$S = \{(u, 0) \mid u \in [u_1, u_2]\}.$$

Dann ist die Menge $S \cap W_a^0 = \{(u_1, 0), (u_2, 0)\}$. Dies ist kein Retrakt von S , aber ein Retrakt von W_a^0 . Damit existiert eine Lösung $u(t, u_0)$, mit $u_0 \in (u_1, u_2)$, die für alle positiven Zeiten in W^0 bleibt. Da W^0 negativ invariant ist, bleibt diese Lösung für alle Zeiten in W^0 . Ein ähnliches Argument funktioniert, wenn man \mathbb{R} durch \mathbb{R}^n ersetzt. Auch dort ist der Rand einer Kugel nicht Retrakt der Kugel, aber Retrakt des entsprechenden Zylinders, vgl. Abbildung 5.5.

Man kann dies auf die Problemstellung von Aufgabe 3.6.2 anwenden. Wir schauen uns nur die eindimensionale Situation an (in höheren Dimensionen hat man das gleiche Argument). Sei $\dot{u} = \lambda u + f(t)$, $\lambda \neq 0$ und $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und beschränkt. Dann existieren Zahlen $u_1 < 0 < u_2$ mit $\lambda u_1 + f(t) < 0 < \lambda u_2 + f(t)$ für alle $t \in \mathbb{R}$. Das vorstehende Argument ist anwendbar, und man erhält eine beschränkte Lösung. Eine Eindeutigkeitsaussage kann man von einem solchen Prinzip nicht erwarten.

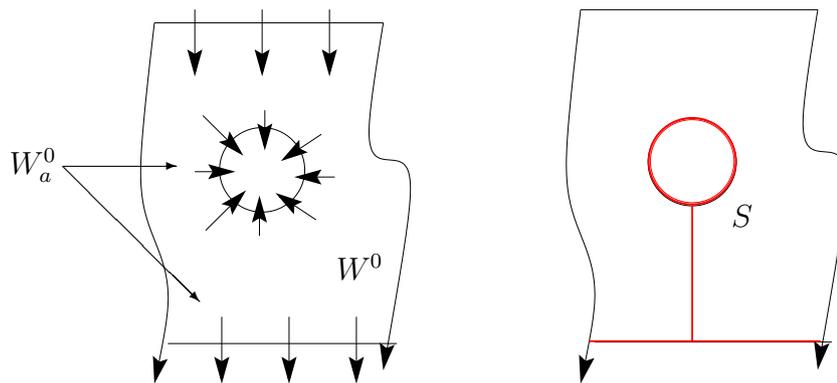


Abbildung 5.6: Wazewski-Prinzip: zweites Beispiel, in der rechten Darstellung die Menge S .

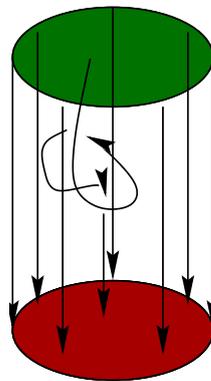


Abbildung 5.7: Ein etwas komplizierteres Beispiel

2.) Wir betrachten die Abbildung 5.6. Hier schließt man auf die Existenz einer Lösung, die für positive Zeiten in W^0 bleibt. Offenkundig besteht $S \cap W_a^0$ aus zwei Komponenten, während S zusammenhängend ist. Da $W_a^0 = S \cap W_a^0$, ist dies offenkundig ein Retrakt von W_a^0 , jedoch kein Retrakt von S . In der angedeuteten zweidimensionalen Situation kann man dann mit dem Satz von Poincaré-Bendixson schließen, dass W^0 sogar eine Ruhelage oder einen geschlossenen Orbit enthält.

3.) Wir erwähnen eine weitere Anwendung, die die Mächtigkeit des Wazewski-Prinzips aufzeigt, jedoch für eine vollständige Begründung mehr Kenntnisse aus der Topologie erfordert, als wir zugrunde legen möchten. Dies ist ein Zylinder mit flussinvariantem Mantel, wobei das Vektorfeld am Boden nach außen gerichtet ist, am Deckel nach innen. Allein die Existenz einer Lösung mit dem angedeuteten Knoten impliziert, dass es eine Lösung gibt, die für alle Zeiten im Inneren bleibt.

5.4 Gradientensysteme

Unter **Gradientensystemen** versteht man Differentialgleichungen, die durch eine Funktion $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, bzw. $F : M \rightarrow \mathbb{R}$ im folgenden Sinne gegeben sind: es sei $f = \nabla F$ und

$$\dot{u} = -f(u)$$

die zu untersuchende gewöhnliche Differentialgleichung. Um den Gradienten einer reellwertigen differenzierbaren Funktion auf einer Mannigfaltigkeit erklären zu können, benötigen wir allerdings noch eine zusätzliche Struktur.

Definition 5.4.1 Eine Mannigfaltigkeit M heißt **Riemannsche Mannigfaltigkeit**, wenn es auf jedem Tangentialraum $T_x M$ ein Skalarprodukt

$$\langle \cdot, \cdot \rangle_{T_x M}$$

gibt, das in folgendem Sinne differenzierbar ist: für jede Karte (U_x, τ_x) und für je zwei differenzierbare Vektorfelder $X, Y : U_x \rightarrow TM|_{U_x}$ bei x ist die Funktion

$$g(X, Y) : U \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto \langle X(x), Y(x) \rangle_{T_x M},$$

differenzierbar.

Definition 5.4.2 Sei M eine Riemannsche Mannigfaltigkeit, $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ eine C^1 -Funktion. Es sei df die zugehörige 1-Form und für festes $x \in M$ ist der **Gradient**

$$\nabla f(x)$$

definiert durch

$$\langle \nabla f(x), v \rangle_{T_x M} = df(x)(v)$$

für alle $v \in T_x M$.

Hat man eine Lösung $u(t)$ dieser gewöhnlichen Differentialgleichung, so erhält man für

$$\frac{d}{dt} F(u(t)) = \langle \nabla F(u(t)), \dot{u}(t) \rangle = -\langle f(u(t)), f(u(t)) \rangle \leq 0.$$

Genauer wird dieser Ausdruck genau dann null, wenn $f(u(t)) = 0$, d.h. wenn $u(t)$ eine Ruhelage ist. Diese einfache Beobachtung hat weitreichende Konsequenzen.

Satz 5.4.3 In einem Gradientensystem bestehen die α - und ω -Grenzmengen jeweils aus stationären Lösungen.

Beweis. Angenommen, $w_1, w_2 \in \omega(\mathcal{O})$ sind zwei Punkte in der ω -Grenzmenge des Orbits \mathcal{O} mit $F(w_2) < F(w_1)$. Sei u eine Lösung im Orbit und $\{t_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine Zeitfolge mit $t_n \rightarrow \infty$ und $u(t_n) \rightarrow w_2$. Dann gibt es eine Zahl $n \in \mathbb{N}$, so dass $|F(u(t_n)) - F(w_2)| < \frac{1}{2}|F(w_1) - F(w_2)|$. Dann ist für $t > t_n$ wegen der Gradientenstruktur auch $F(u(t)) < F(u(t_n))$, und insbesondere gilt

$$F(u(t)) < F(w_1) - \frac{1}{2}(F(w_1) - F(w_2)) = \frac{1}{2}(F(w_1) + F(w_2)),$$

also ist $F(u(t))$ von $F(w_1)$ wegbeschränkt. Demzufolge gibt es keine Folge mit $t_m \rightarrow \infty$ mit $u(t_m) \rightarrow w_1$. Dies ist ein Widerspruch zur Annahme, dass $F(w_1) \neq F(w_2)$ ist und daher folgt $F(w_1) = F(w_2)$. Längs Trajektorien in der Grenzmenge ist also F konstant, also nach der Vorüberlegung $f = 0$, und daher ist eine solche Trajektorie die einer Ruhelage. \square

Definition 5.4.4 Wir nennen die Mengen $F = \text{const}$ **Niveaumengen**. Insbesondere sagen wir, zwei Punkte w_1, w_2 sind von **verschiedenem Niveau**, falls $F(w_1) \neq F(w_2)$.

Satz 5.4.5 (Charakterisierung der Attraktoren von Gradientensystemen) Attraktoren in Gradientensystemen bestehen aus Ruhelagen und aus verbindenden Orbits von Ruhelagen unterschiedlichen Niveaus.

Beweis. Folgt sofort aus dem zuvor gesagten. \square

Beispiel 5.4.6 In diesem Beispiel wollen wir sehen, dass es Attraktoren gibt, die aus mehr als nur Ruhelagen bestehen. Es sei

$$\dot{x} = x(1 - x^2).$$

Dann ist $[-1, 1]$ ein Attraktor, der aus den Ruhelagen $-1, 0, 1$ besteht und den verbindenden Orbits.

5.5 Hamiltonsche Systeme

Ähnlich wie Gradientensysteme sind auch Hamiltonsche Systeme⁵ durch die Angabe einer reellwertigen Funktion bestimmt. Hamiltonsche Systeme spielen vor allem in der Mechanik eine zentrale Rolle, viele Probleme werden in der Sprache Hamilton'scher Systeme formuliert und gelöst. Die Theorie Hamilton'scher Systeme ist bereits seit Euler bei der mathematischen Beschreibung mechanischer Probleme fest etabliert, allerdings auch heute noch von enormer Bedeutung, wenn man auch heute oft die Theorie

⁵William Rowan Hamilton (4.8.1805-2.9.1865), irischer Mathematiker und Physiker, fand 1822 einen Fehler in Laplace's Arbeit „Mécanique céleste“. Er arbeitete als Astronom, fand aber viele bedeutende mathematische Ergebnisse, u.a. die Quaternionen und die nach ihm benannten Funktionen und Differentialgleichungen.

Hamilton'scher Systeme hinter anderen Begriffen versteckt: z.B. symplektische Geometrie. Die Bedeutung wird vielleicht dadurch ersichtlich, dass bei dem International Congress of Mathematics 1998 alle Hauptvorträge zum Thema Differentialgleichungen/Dynamische Systeme mit einer Ausnahme symplektische Geometrie zum Thema hatten. Diese Bedeutung wird untermauert dadurch, dass auch heute noch alle bedeutenden Mathematiker auf dem Gebiet der Differentialgleichungen dieses Gebiet bearbeiten. Wir wollen dieser Bedeutung Rechnung tragen, indem wir diese Systeme definieren und einige wichtige Eigenschaften kennenlernen.

Da in einem Hamilton'schen System immer Impuls- und Ortsvariable gleichberechtigt auftauchen, lebt ein solches System auf natürliche Weise auf dem \mathbb{R}^{2n} . Es sei

$$J = \begin{pmatrix} 0 & -\mathbb{1} \\ \mathbb{1} & 0 \end{pmatrix}.$$

Definition 5.5.1 Eine Differentialgleichung $\dot{u} = f(u)$ auf \mathbb{R}^{2n} heißt Hamilton'sch, falls es eine Funktion $H : \mathbb{R}^{2n} \rightarrow \mathbb{R}$ gibt mit $f(u) = J\nabla H(u)$.

Bemerkung 5.5.2 In mechanischen Systemen wird H oft als Energie interpretiert. Der Energieerhaltungssatz für solche Systeme lautet dann

$$\frac{d}{dt}H(u(t)) = 0.$$

Wie man leicht sieht, gilt in Hamilton'schen Systemen der Energieerhaltungssatz.

Satz 5.5.3 H bleibt längs Orbits der zugehörigen Differentialgleichung konstant.

Beweis. Wir schreiben $p = (u_1, \dots, u_n)$, $q = (u_{n+1}, \dots, u_{2n})$. Damit wird ein Hamilton'sches System zu

$$\begin{aligned} \dot{p} &= -\frac{\partial H}{\partial q} \\ \dot{q} &= \frac{\partial H}{\partial p}. \end{aligned}$$

Wir berechnen die Ableitung und erhalten

$$\frac{d}{dt}H(u(t)) = \frac{\partial H}{\partial p}\dot{p} + \frac{\partial H}{\partial q}\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p} \left(-\frac{\partial H}{\partial q} \right) + \frac{\partial H}{\partial q} \frac{\partial H}{\partial p} = 0.$$

□

Definition 5.5.4 Ein Fluss $\varphi_t : U \times \mathbb{R} \rightarrow U$ heißt **volumenerhaltend**, wenn für jede meßbare, beschränkte Menge $V \subset U$ gilt, dass $\mu(V) = \mu(\varphi_t(V))$ für alle $t \geq 0$, wobei μ das Lebesgue-Maß auf dem \mathbb{R}^n ist.

Satz 5.5.5 *Der Fluss einer Hamilton'schen Differentialgleichung ist volumenerhaltend.*

Beweis. Sei V offen und beschränkt, wir zeigen

$$\mu(\varphi_t(V)) = \mu(V)$$

für alle $t \in \mathbb{R}$. Dazu zeigen wir $\frac{d}{dt}\mu(\varphi_t(V)) = 0$. Mit der Transformationsformel erhält man

$$\mu(\varphi_t(V)) = \int_{\varphi_t(V)} dx = \int_V |\det D_x \varphi_t(x)| dx.$$

Es gilt

$$\varphi_t(x) = x + tf(X) + O(t^2),$$

also

$$D_x \varphi_t(x) = \mathbb{1} + tD_x f(X) + O(t^2).$$

Zur Berechnung der Determinante bemerkt man

$$\det(\mathbb{1} + tA) = 1 + t \operatorname{tr}(A) + O(t^2).$$

Zusammen ergibt sich

$$\det D_x \varphi_t(x) = 1 + t \operatorname{tr}(D_x f(x)) + O(t^2) = 1 + t \operatorname{div} f(x) + O(t^2).$$

Also ist

$$\frac{d}{dt}\mu(\varphi_t(V))|_{t=0} = \int_V \operatorname{div} f(x) dx.$$

Hat man $\operatorname{div} f = 0$, so ist diese Ableitung null und demzufolge der Fluss volumenerhaltend.

Dazu muss man noch die Divergenz eines Hamiltonschen Vektorfeldes ausrechnen. Man erhält

$$\operatorname{div} J\nabla H(u) = \operatorname{div}_p\left(-\frac{\partial H}{\partial q}\right) + \operatorname{div}_q\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right) = 0.$$

□

Korollar 5.5.6 *Ein divergenzfreies Vektorfeld ist volumenerhaltend.*

Bemerkung 5.5.7 *Ein Hamiltonsches Vektorfeld ist immer volumenerhaltend, aber ein volumenerhaltendes ist nicht immer hamiltonsch. Ein hamiltonsches System erhält nämlich nicht nur eine Volumenform (sozusagen infinitesimales Volumen) $d\operatorname{vol}$, sondern sogar eine **symplektische Form**: Das ist eine schiefsymmetrische 2-Form ξ , welche "nicht ausgeartet" ist, was hier bedeutet, dass $\xi \wedge \cdots \wedge \xi$ (n -maliges Dachprodukt) eine Volumenform ist. Da so eine symplektische Form somit immer eine Volumenform produziert, folgt aus der Invarianz der symplektischen Form, dass auch das Volumen invariant ist.*

Im \mathbb{R}^{2n} ist z.B.

$$\xi = \sum_{i=1}^n dx_i \wedge dx_{n+i}$$

so eine symplektische Form.

Definition 5.5.8 1. Eine Ruhelage x_0 heißt **asymptotisch stabil**, wenn es eine Umgebung U von x_0 gibt mit $x_0 = \omega(u_0)$ für alle $u_0 \in U$.

2. Eine periodische Lösung P heißt **asymptotisch stabil**, wenn es eine Umgebung U von P gibt, mit $P = \omega(u_0)$ für alle $u_0 \in U$.

Bei dieser Definition impliziert weder Lyapunov-Stabilität die asymptotische Stabilität noch umgekehrt. In vielen Büchern wird bei der Definition der asymptotischen Stabilität gleich die (Lyapunov-)Stabilität mitgefordert. Dann impliziert sie diese natürlich per Definition.

Satz 5.5.9 In Hamiltonschen Systemen gibt es weder asymptotisch stabile Ruhelagen, noch asymptotisch stabile periodische Lösungen.

Beweis. Widerspricht dem Volumenerhaltungssatz in einer Umgebung der Ruhelage, bzw. des periodischen Orbits. \square

Satz 5.5.10 (Poincaréscher Wiederkehrsatz) Es sei $G \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet und $\varphi : G \rightarrow G$ sei stetig, volumenerhaltend und injektiv. Dann gilt: Für jeden Punkt $y \in G$ und jede Umgebung U von y existiert ein Punkt $x \in U$ und ein $n \in \mathbb{N}$ mit $\varphi^n(x) \in U$.

Beweis. Wegen des Erhalts des Volumens gilt $\mu(\varphi^n(U)) = \mu(U)$. Sind alle $\varphi^n(U)$ disjunkt, so folgt

$$\mu \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} \varphi^n(U) \right) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(U) = \infty.$$

Daher ist die Familie der $\varphi^n(U)$ nicht disjunkt. Ist aber $v \in \varphi^n(U) \cap \varphi^j(U)$, so gibt es $x, w \in U$ mit $v = \varphi^n(x) = \varphi^j(w)$, also (o.B.d.A. $n > j$) $U \ni w = \varphi^{n-j}(x)$. \square

Korollar 5.5.11 Ist $\alpha \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ und $g : S^1 \rightarrow S^1 : z \mapsto e^{i\alpha}z$, so ist der Orbit eines Punktes $\{e^{in\alpha}z\}_{n \in \mathbb{N}}$ (unter der Operation g) dicht in S^1 .

Beweis. g ist Homöomorphismus und volumenerhaltend. Sind $z_1, z_2 \in S^1$, $z_2 = e^{i\phi}z_1$, so geht der Orbit $e^{in\alpha z_2}$ durch Multiplikation aus dem von z_1 hervor. Also ist entweder jeder Orbit dicht, oder es ist kein Orbit dicht. Wir zeigen die Dichtheit eines Orbits in zwei Schritten:

1. Jeder Punkt eines Orbits ist Häufungspunkt der anderen Punkte des Orbits.
 Angenommen dies wäre nicht der Fall, dann gibt es eine Umgebung $B_\varepsilon(y)$, die keinen weiteren Punkt von des Orbits von y enthält. Betrachte $B_{\frac{\varepsilon}{4}}(y)$. Es gibt darin einen Punkt x und eine Iterierte, die wieder in dieser Umgebung landet. Dann ist aber der Orbit von y der von x um den entsprechenden (kleinen) Winkel gedreht. Also schneidet er die ursprüngliche ε -Umgebung in einem Punkt z . Dann ist $z \neq y$, da ansonsten α rational wäre.
 Insbesondere ist 1 Häufungspunkt des Orbits von 1.
2. Der Orbit von 1 ist dicht in S^1 .
 Angenommen, dies wäre nicht der Fall, so gäbe es einen Punkt $w \in S^1$ und eine Umgebung $B_\varepsilon(w)$, die vom Orbit von 1 nicht getroffen wird. Sei $y \in B_{\frac{\varepsilon}{4}}(1) \cap \mathcal{O}(1)$. Dann ist jede Potenz von y im Orbit von 1, und zwei benachbarte Punkte sind nicht weiter als $\frac{\varepsilon}{4}$ voneinander entfernt. Dies widerspricht der Konstruktion von w . □

Bemerkung 5.5.12 1. Eine zumindest auf den ersten Blick überraschende Anwendung des Poincaré'schen Wiederkehrsatzes ist das folgende Gedankenexperiment. Das Verhalten eines Gases kann als Vielteilchensystem modelliert werden, so dass für jedes Molekül eine Gleichung für Ort und Impuls aufgeschrieben wird. Bei ca. $6 \cdot 10^{23}$ -Teilchen hat man dann $6 \cdot 6 \cdot 10^{23}$ Gleichungen. Es stellt sich heraus, dass diese Gleichungen Hamilton'sch und damit volumenerhaltend im $\mathbb{R}^{6 \cdot 6 \cdot 10^{23}}$ sind. Stellen wir uns nun einen Behälter vor, der durch eine Wand in zwei Teile geteilt wird, von denen eine mit einem Gas gefüllt ist, und die andere leer ist. Diese Situation ist unsere Anfangsbedingung. Öffnet man nun die Wand, kann sich das Gas ungehindert in beide Teile ausbreiten. Der Poincaré'sche hWiederkehrsatz sagt nun, dass es eine Umgebung der Ausgangsbedingung gibt, so dass der Orbit nach einer genügend langen Zeit in diese Umgebung zurückkehrt.

Dieses Ergebnis erscheint widersinnig, denn es entspricht nicht unserer Erfahrung. Allerdings ist die Zeit, die für diese Wiederkehr normalerweise benötigt wird, länger als die Zeit der Existenz unseres Sonnensystems. Da dieser Zeitraum jenseits unserer erfahrenen Wirklichkeit liegt, sollten wir unsere Erfahrung auch nicht zur Grundlagen von diesbezüglichen Aussagen machen.

Physiker haben sich übrigens seit über einem Jahrhundert über folgende Frage gestritten: Kann es ein kleines Wesen bzw. eine kleine Maschine geben (genannt Maxwell⁶-Dämon), welcher/welche an der Öffnung in der Wand sitzt und eine dort befindliche Tür so öffnet oder schließt, dass mehr Gasmoleküle in die erste Kammer wandern als umgekehrt, und welche beliebig wenig Energie verbraucht? (D.h. für alle $\varepsilon > 0$ gibt es eine solche Maschine mit Verbrauch $< \varepsilon$. Oder auch nur für $\varepsilon < \text{typische Energie eines Moleküls.}$) So ein Dämon könnte sehr schnell den oben erwähnten paradoxen Zustand erzeugen,

⁶James Clerk Maxwell (1831 – 1879) war ein britischer mathematischer Physiker. Hauptsächlich bekannt ist er für seine Arbeiten zur Elektrodynamik; die wichtigsten Gleichungen dieser Theorie sind nach ihm benannt. Außerdem hat er entscheidende Beiträge zur Thermodynamik (kinetische Gastheorie) geliefert. Der hier erwähnte Dämon ist erstmals 1871 in einer Arbeit von Maxwell erwähnt.

dass sich ein Gas ohne äußere Energiezufuhr in einem Teil des Behältnisses sammelt. Das wäre spektakulär, denn damit könnte man Maschinen bauen, die nur aus der Umgebungstemperatur Energie erzeugen (z.B. Autos, Flugzeuge und Schiffe, die ganz ohne Treibstoff fahren). Es würde auch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ("Unordnung nimmt immer zu") widerlegen, welcher eine der wichtigsten Annahmen der Physik ist. Deswegen haben Physiker seit der ersten Beschreibung des Dämons nach Beweisen für dessen Nichtexistenz gesucht und auch viele "Beweise" verfasst, von denen aber die meisten (vielleicht alle?) bei genauer Betrachtung unrettbar falsch sind.

2. Eine weitere überraschende Anwendung des Satzes besteht aus der Deformation und dem Zerschneiden eines Bildes nach einer fest vorgegebenen Regel. Iteriert man diesen Prozess, so besagt der Satz, findet man das ursprüngliche Bild irgendwann (fast) wieder. Wir wollen uns ein Beispiel ansehen.

5.6 Aufgaben

Aufgabe 5.6.1 (a) Eine Teilmenge $G \subset \mathbb{R}$ heißt **abgeschlossene Untergruppe** von \mathbb{R} , wenn G eine abgeschlossene Teilmenge und gleichzeitig, bezüglich der Addition, eine Untergruppe ist. Man beschreibe alle abgeschlossenen Untergruppen von \mathbb{R} .

(b) Gegeben sei eine stetige Funktion $x : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Eine Zahl $T \in \mathbb{R}$ heißt Periode von x , wenn für alle $t \in \mathbb{R}$ gilt $x(t+T) = x(t)$. Man zeige, die Menge

$$P_x = \{T \in \mathbb{R} \mid T \text{ ist Periode von } x\}$$

ist eine abgeschlossene Untergruppe von \mathbb{R} .

(c) Man zeige, gibt es für die Lösung $u(t, t_0, u_0)$ des autonomen Anfangswertproblems

$$\dot{u} = f(u), \quad u(t_0) = u_0$$

zwei verschiedene Zeitpunkte t_1, t_2 mit $u(t_1, t_0, u_0) = u(t_2, t_0, u_0)$, so existiert die Lösung für alle $t \in \mathbb{R}$ und ist periodisch, d.h. es existiert eine Zahl $T > 0$ mit $u(t+T, t_0, u_0) = u(t, t_0, u_0)$.

Aufgabe 5.6.2 (a) Was ist der Phasenraum, bzw. der erweiterte Phasenraum für die Gleichungen $\dot{u} = u$, bzw. $\dot{u} = u(1-u)$ in \mathbb{R} . Was sind die Trajektorien, bzw. die Orbits?

(b) Man beantworte die gleichen Fragen für die Gleichung im \mathbb{R}^2 gegeben durch

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= -u_2 + u_1(1-r^2) \\ \dot{u}_2 &= u_1 + u_2(1-r^2), \end{aligned}$$

wobei $r = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$ ist.

Aufgabe 5.6.3 Man zeige den Begradigungssatz 5.1.21

Aufgabe 5.6.4 Man überlege sich, ob der Satz von Poincaré-Bendixson für Differentialgleichungen auf der zweidimensionalen Sphäre, bzw. dem zweidimensionalen Torus richtig ist.

Aufgabe 5.6.5 Sei $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ differenzierbar. Ist $G \subset \mathbb{R}^2$ ein einfach zusammenhängendes Gebiet, so dass $\operatorname{div}(f)$ ein konstantes Vorzeichen auf G hat, so gibt es keinen geschlossenen Orbit in G .

Aufgabe 5.6.6 Sei $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und G sei die Stammfunktion definiert durch

$$G(y) = \int_0^y g(s) ds.$$

(a) Man schreibe die Gleichung $\ddot{u} + g(u)\dot{u} + u = 0$ um in ein zweidimensionales autonomes System.

(b) G sei ungerade in y , es gelte $G(y) \rightarrow \infty$ für $|y| \rightarrow \infty$. Weiterhin nehmen wir an, dass es positive Zahlen $0 < \alpha < \beta$ gibt mit $G(y) < 0$ auf $(0, \alpha)$, $G(\alpha) = 0$ und auf dem Intervall $[\beta, \infty)$ ist $G(y) > 0$ und monoton steigend. Man zeige, dass das in (a) erhaltene System eine periodische Lösung besitzt.

Aufgabe 5.6.7 Man überlege sich ein Beispiel, das zeigt, dass beim Wazewski-Prinzip die Voraussetzung, $W_a^0 \cap S$ ist Retrakt von W_a^0 , gebraucht wird.

Aufgabe 5.6.8 1. Man bestimme die linearen Hamilton'schen Systeme.

2. Ist $x \mapsto Ax$ ein Hamilton'sches Vektorfeld, so nennen wir A symplektisch. Man zeige: Für symplektische Matrizen gilt $|\det A| = 1$.

3. Was folgt für die Eigenwerte symplektischer Matrizen?

4. Für eine symplektische Matrix gilt $\det A = 1$.

Kapitel 6

Stabilität

6.1 Die Stabilität einer Ruhelage

In diesem Abschnitt sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen und $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Lipschitz stetige Abbildung. Wir betrachten die Differentialgleichung (5.1.1) $\dot{u} = f(u)$ und erinnern an Definition 5.5.8.

Definition 6.1.1 Eine Ruhelage u_0 der Gleichung (5.1.1) heißt **stabil** oder **Lyapunov-stabil** oder **Poisson-stabil**, wenn die Menge $\{u_0\}$ gemäß Definition 5.1.27 stabil ist. Die Ruhelage wird **asymptotisch stabil** genannt, wenn die Menge $\{u_0\}$ ein **Attraktor** im Sinne der Definition 5.1.28 ist. Ist u_0 nicht stabil, so nennen wir u_0 **instabil**.

In der Literatur wird bei der Definition von asymptotischer Stabilität oft die (Lyapunov-)Stabilität bereits vorausgesetzt. Ein hinreichendes Stabilitätskriterium geht auf den russischen Mathematiker Lyapunov¹ zurück, das er in seiner Dissertation im Jahre 1892 bewies. Zwei Hilfssätze wollen wir vorab bereitstellen.

Hilfssatz 6.1.2 (a) Sei $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$. Dann gibt es zu jedem $\alpha > \max\{\operatorname{Re}(\lambda) \mid \lambda \in \sigma(A)\}$ eine Konstante $M_\alpha \geq 1$, so dass für alle $t \geq 0$ gilt:

$$\|E(A, t)\| \leq M_\alpha e^{\alpha t}.$$

¹Aleksandr Michailowitsch Lyapunov (6.6.1857-3.11.1918) leistete in seiner Dissertation fundamentale Beiträge zur Stabilitätstheorie. Weitere Ergebnisse in der Theorie der Differentialgleichungen betreffen die Gleichgewichtsfiguren rotierender Flüssigkeiten, ein Problem, das von Riemann studiert worden war und bis heute aktuell ist.

Die Schreibweise seines Namens variiert in der deutschen Literatur. In der englischsprachigen Welt dagegen gibt es eine eindeutige Standard-Transkription, weswegen wir diese verwenden; das ist auch z.B. bei Internet-Recherchen am praktischsten. Die korrekteste Schreibweise ist natürlich in kyrillischer Originalschrift:

Александр Михайлович Ляпунов

(b) Entsprechend gibt es zu jedem $\beta < \min \{ \operatorname{Re}(\lambda) \mid \lambda \in \sigma(A) \}$ eine Konstante $N_\beta \geq 1$, so dass für alle $t \leq 0$ gilt:

$$\|E(A, t)\| \leq N_\beta e^{\beta t}.$$

Beweis. Es reicht (a) zu beweisen. Die Aussage (b) folgt dann in gleicher Weise. Die Aussage folgt im wesentlichen aus dem Beweis des Satzes über Spektrum und Stabilität I, d.h. Satz 3.5.1. Sei α wie im Hilfssatz angegeben. Wir schreiben $A = A - \alpha \mathbb{1} + \alpha \mathbb{1}$. Da $\mathbb{1}$ mit jeder anderen Matrix kommutiert, erhält man

$$\|E(A, t)\| \leq e^{\alpha t} \|E(A - \alpha \mathbb{1}, t)\|.$$

Da alle Eigenwerte von $A - \alpha \mathbb{1}$ in der linken Halbebene sind, ist nach dem Beweis von Satz 3.5.1 $E(A - \alpha \mathbb{1}, t)$ für $t \geq 0$ beschränkt. Das heißt also, es gibt eine Konstante $M_\alpha > \|E(A - \alpha \mathbb{1}, t)\|$ und damit $\|E(A, t)\| < M_\alpha e^{\alpha t}$, wie behauptet. \square

Hilfssatz 6.1.3 Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ eine offene Umgebung der Null, $g : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ sei stetig differenzierbar mit $g(0) = 0$, $Dg(0) = 0$. Dann existiert zu jedem $L > 0$ eine Zahl $\eta > 0$ mit

$$|u_1| < \eta, |u_2| < \eta \Rightarrow |g(u_1) - g(u_2)| < L|u_1 - u_2|.$$

Beweis. Da die Ableitung $Dg(u)$ stetig in U ist, läßt sich zu jeder Konstante $L > 0$ eine Zahl $\eta > 0$ finden, so dass $\|Dg(u)\| < L$ für $|u| < \eta$ ist. Wegen des Mittelwertsatzes läßt sich die Lipschitz Konstante auf einer Umgebung durch die maximale Norm der Ableitung abschätzen. \square

Satz 6.1.4 (Lyapunov, Spektrum und Stabilität II) Gegeben sei eine autonome Differentialgleichung (5.1.1) mit einer Ruhelage u_0 . Die Abbildung f sei in einer Umgebung von u_0 stetig differenzierbar und $A = Df(u_0)$ sei die Linearisierung (Ableitung) von f im Punkt u_0 . Dann gilt:

1. Haben alle Eigenwerte von A negative Realteile, so ist u_0 stabil und asymptotisch stabil.
2. Gibt es einen Eigenwert von A dessen Realteil positiv ist, so ist u_0 weder stabil noch asymptotisch stabil.

Beweis. Wir beweisen zunächst die Stabilitätsaussage. O.B.d.A. dürfen wir davon ausgehen, dass $u_0 = 0$ ist. Zur Erleichterung der Schreibweise wollen wir dies auch tun. Da $A = Df(0)$ ist, kann man die Abbildung f in der Form $f(u) = Au + g(u)$ schreiben, wobei g bei 0 stetig differenzierbar ist und $Dg(0) = 0$ ist. Also hat die zu betrachtende Gleichung die Form

$$(6.1.5) \quad \dot{u} = Au + g(u)$$

Wir müssen die Stabilität und die Attraktivität von $u_0 = 0$ zeigen. Die Stabilität kann man auch so formulieren: Zu jedem $\varepsilon > 0$ existiert ein $\delta > 0$, so dass

$$|v_0| < \delta \implies |u(t, v_0)| < \varepsilon \quad \forall t \geq 0.$$

Sei also $\varepsilon > 0$ gegeben. Sei $v_0 \in U$. Die Lösung $u(t) = u(t, v_0)$ von (6.1.5) genügt der Integralgleichung

$$u(t) = E(A, t)v_0 + \int_0^t E(A, t-s)g(u(s))ds,$$

da natürlich nach Einsetzen der Lösung $u(t, v_0)$ in die Gleichung (6.1.5) daraus mit $h(t) = g(u(t, v_0))$ die äquivalente Gleichung

$$\dot{u} = Au + h(t)$$

entsteht. Sei $\mu = \max\{\operatorname{Re}(\lambda) \mid \lambda \in \sigma(A)\}$. Dann ist $\mu < 0$ und die Norm von $E(A, t)$ kann für jedes $\alpha \in (\mu, 0)$ abgeschätzt werden durch

$$\|E(A, t)\| \leq M_\alpha e^{\alpha t},$$

wobei M_α die reelle Konstante ist, deren Existenz der Hilfssatz 6.1.2 gewährleistet. Wir finden auch eine positive Konstante $L > 0$ mit

$$M_\alpha L < \frac{1}{2} \min\{-\alpha, 1\}.$$

Nach Hilfssatz 6.1.3 gibt es ein $\eta > 0$, $\eta < \varepsilon$, so dass auf $B_\eta(0)$ die Funktion g die Lipschitz Konstante L hat. Sei $\delta = \frac{1}{2} \frac{\eta}{M_\alpha}$. Nun hat man für $|v_0| < \delta$ die Abschätzung

$$(6.1.6) \quad |u(t, v_0)| \leq \|E(A, t)\| |v_0| + \int_0^t \|E(A, t-s)\| |g(u(s, v_0))| ds.$$

Einsetzen ergibt (jedenfalls solange $|u(s, v_0)| < \eta$ ist)

$$\begin{aligned} |u(t, u_0)| &\leq M_\alpha e^{\alpha t} \delta + M_\alpha L \eta \int_0^t e^{\alpha(t-s)} ds \\ &< \frac{1}{2} \eta + M_\alpha L \eta \frac{1}{|\alpha|} (1 - e^{\alpha t}) \\ &< \frac{1}{2} \eta + M_\alpha L \eta \frac{1}{|\alpha|} \\ &< \eta < \varepsilon. \end{aligned}$$

Damit hat man die Stabilität, denn angenommen es gäbe eine Zahl $t^* > 0$ mit $|u(t^*, v_0)| = \eta$, dann kann man o.B.d.A. davon ausgehen, dass t^* minimal gewählt wurde. Dann ist für $t \in (0, t^*)$ $|u(t, v_0)| < \eta$. Unsere Abschätzung garantiert, dass auch noch für $t = t^*$ die Lösung $u(t, v_0)$ in $B_\eta(0)$ enthalten ist. Damit ergibt sich ein Widerspruch.

Um die asymptotische Stabilität zu zeigen, nutzen wir die Formel (6.1.6) und schätzen etwas anders ab:

$$(6.1.7) \quad |u(t, v_0)| \leq M_\alpha e^{\alpha t} \delta + M_\alpha L \int_0^t e^{\alpha(t-s)} |u(s, v_0)| ds.$$

Multiplikation mit $e^{-\alpha t}$ liefert für die Funktion $v(t) = e^{-\alpha t} |u(t, v_0)|$ die Abschätzung

$$v(t) \leq M_\alpha \delta + M_\alpha L \int_0^t v(s) ds.$$

Hier verwenden wir das Lemma von Gronwall (Lemma 2.2.2) und erhalten

$$v(t) \leq M_\alpha \delta e^{M_\alpha L t}.$$

Damit ergibt sich für $u(t, u_0)$ die Abschätzung

$$|u(t, u_0)| \leq M_\alpha \delta e^{(M_\alpha L + \alpha)t}.$$

Da $M_\alpha L + \alpha < 0$ ist, konvergiert dies gegen Null. Damit ist die asymptotische Stabilität gezeigt.

Wir nehmen nun an, dass die Linearisierung einen Eigenwert mit positivem Realteil besitzt. Wir zeigen, dass es eine nichttriviale Lösung $u(t)$ gibt mit $u(t) \rightarrow w_0$ für $t \rightarrow -\infty$. Daraus folgt dann die Behauptung. Zunächst wollen wir uns überlegen, wie die Aussage des Satzes aus dieser Tatsache folgt. Dann werden wir dies als eigenes Lemma formulieren. Sei $u(t)$ eine Lösung mit $u(t) \rightarrow w_0 = 0$ für $t \rightarrow -\infty$. Sei $\varepsilon = |u(0)| > 0$. (Es ist keine Beschränkung der Allgemeinheit anzunehmen, dass 0 im maximalen Existenzintervall enthalten ist.) Angenommen, es existiere ein $\delta > 0$, so dass aus $|u_0| < \delta$ folgen würde, dass für alle $t \geq 0$ gilt $|u(t, u_0)| < \varepsilon$, so könnte man schließen, dass $|u(t)| > \delta \forall t \leq 0$. Dies ist ein Widerspruch. Wie angekündigt wollen wir die Existenz von $u(t)$ getrennt zeigen. \square

Definition 6.1.8 Sei $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$. Dann bezeichnen wir mit E^+ die Summe der verallgemeinerten Eigenräume zu Eigenwerten mit positivem Realteil, entsprechend mit E^- die Summe der verallgemeinerten Eigenräume zu Eigenwerten mit negativem Realteil, und E^0 entsprechend mit Realteil 0. P^+ , P^- , P^0 schreiben wir für die Projektoren auf diese Räume mit Kern $E^0 \oplus E^-$ bzw. $E^+ \oplus E^-$ bzw. $E^0 \oplus E^+$. Weiter seien $Q^+ = I - P^+$, $Q^- = I - P^-$ die entsprechenden komplementären Projektoren. Weiterhin wollen wir vereinbaren, dass $\sigma^+(A)$ für $\sigma(A) \cap \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Re}(z) > 0\}$ steht und ganz entsprechend $\sigma^0(A) = \sigma(A) \cap \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Re}(z) = 0\}$, bzw. $\sigma^-(A) = \sigma(A) \cap \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Re}(z) < 0\}$ definiert sind.

Lemma 6.1.9 Die Räume E^+ , E^- und E^0 sind invariante Unterräume für A , d.h. $AE^+ \subset E^+$, $AE^- \subset E^-$ und schließlich $AE^0 \subset E^0$.

Beweis. Folgt sofort aus der Definition der Räume. \square

Definition 6.1.10 Die Einschränkungen von A auf die verschiedenen Unterräume wollen wir folgendermaßen bezeichnen:

$$\begin{aligned} A_u &= A|_{E^+} \\ A_s &= A|_{E^-} \\ A_c &= A|_{E^0} \\ A_{cu} &= A|_{E^0 \oplus E^+} \\ A_{cs} &= A|_{E^0 \oplus E^-} \end{aligned}$$

Lemma 6.1.11 (a) Die jeweiligen Spektren dieser lineare Abbildungen sind gegeben durch:

$$\begin{aligned} \sigma(A_u) &= \sigma^+(A) \\ \sigma(A_s) &= \sigma^-(A) \\ \sigma(A_c) &= \sigma^0(A) \\ \sigma(A_{cu}) &= \sigma^0(A) \cup \sigma^+(A) \\ \sigma(A_{cs}) &= \sigma^0(A) \cup \sigma^-(A). \end{aligned}$$

(b) Die Matrixexponentialfunktionen der Einschränkungen A_u , A_{cs} genügen den Abschätzungen:

$$\begin{aligned} \forall \beta < \frac{1}{3} \min \{ \operatorname{Re}(\lambda) \mid \lambda \in \sigma^+(A) \} \quad \exists N_{3\beta} \geq 1 \quad \forall t \leq 0 : \|E(A_u, t)\| \leq N_{3\beta} e^{3\beta t}, \\ \forall \alpha > 0 \quad \exists M_\alpha \geq 1 \quad \forall t > 0 : \|E(A_{cs}, t)\| \leq M_\alpha e^{\alpha t}. \end{aligned}$$

Beweis. Folgt unmittelbar aus Hilfssatz 6.1.2. □

Bemerkung 6.1.12 Ähnliche Abschätzungen gelten natürlich auch für die anderen Teile von A .

Bemerkung 6.1.13 Außerdem kann man eine solche Dreiteilung auch an anderen Achsen als der imaginären Achse vornehmen.

Satz 6.1.14 Sei $\dot{u} = Au + g(u)$ eine autonome Differentialgleichung mit stetig differenzierbarem $g : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ und $g(0) = 0$, $Dg(0) = 0$. Hat A Eigenwerte mit positivem Realteil, so existiert eine Umgebung $B_\delta(0)$, so dass zu jedem $u_0 \in B_\delta(0) \cap E^+$ eine Lösung $u(t)$ existiert mit

1. $P^+u(0) = u_0$,
2. $u(t) \rightarrow 0$ für $t \rightarrow -\infty$.

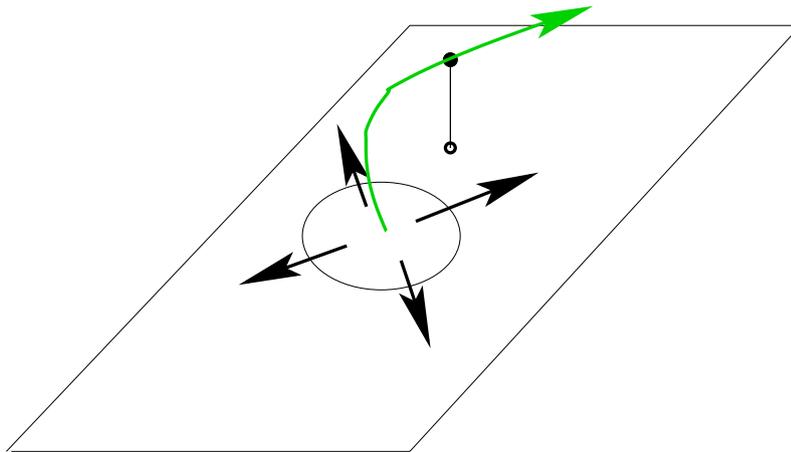


Abbildung 6.1: Existenz einer Lösung, die für $t \rightarrow -\infty$ gegen eine Ruhelage konvergiert. Die schwarzen Pfeile deuten den linearisierten Fluss in dem Raum E^+ an, die grüne Linie eine Lösung der Gleichung mit $P^+u(0) = u_0$.

Beweis. Wähle ein

$$\alpha \in \left(0, \frac{1}{3} \min \{ \operatorname{Re}(\lambda) \mid \lambda \in \sigma^+(A) \} \right).$$

Dann gibt es nach dem oben angegebenen Lemma 6.1.11 Zahlen M_α und $N_{3\alpha}$ mit den entsprechenden Abschätzungen $\|E(A_{cs}, t)\| \leq M_\alpha e^{\alpha t}$ für positive t und

$$\|E(A_u, t)\| \leq N_{3\alpha} e^{3\alpha t}$$

für nichtpositive t . Setze

$$M = \max \{ M_\alpha, N_{3\alpha} \}.$$

Damit gilt $\|E(P^+A, t)P^+\| \leq M e^{3\alpha t}$ für $t \leq 0$ und $\|E(Q^+A, t)Q^+\| \leq M e^{\alpha t}$ für $t > 0$. Wir wählen $\eta > 0$ so klein, dass

$$\frac{ML(\eta)}{\alpha} \max \{ \|P^+\|, \|Q^+\| \} < \frac{1}{4}$$

ist, wobei $L(\eta)$ die Lipschitz Konstante von g auf $B_\eta(0)$ ist. Wir betrachten den Raum der Funktionen

$$C^\alpha(u_0) = \{ u : (-\infty, 0] \rightarrow U \mid u \text{ ist stetig, } |u(t)| < \eta e^{2\alpha t} < \infty, P^+u(0) = u_0 \}.$$

Auf $C^\alpha(u_0)$ definieren wir eine Metrik d^α durch

$$d^\alpha(u, v) = \eta \sup \{ |u(t) - v(t)| e^{-2\alpha t} \mid t \leq 0 \}.$$

d^α macht $C^\alpha(u_0)$ zum vollständigen, metrischen Raum. Wir prüfen die Vollständigkeit nach. Sei $\{u_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge bezüglich der Metrik d^α . Dann existiert ein

punktweiser Limes $u(t)$. Wir müssen zeigen, dass u wieder in C^α liegt. Dazu prüfen wir die Wachstumsbedingung nach:

$$|u(t)| \leq |u(t) - u_n(t)| + |u_n(t)| \leq |u(t) - u_n(t)| e^{-2\alpha t} e^{2\alpha t} + \eta e^{2\alpha t} \leq (d^\alpha(u, u_n) + \eta) e^{2\alpha t} \leq (\varepsilon + \eta) e^{2\alpha t}.$$

Wir setzen für $t \leq 0$

$$(6.1.15) \quad Tu(t) = e^{P^+ A t} u_0 + \int_0^t e^{P^+ A(t-s)} P^+ g(u(s)) ds + \int_{-\infty}^t e^{Q^+ A(t-s)} Q^+ g(u(s)) ds.$$

Wir müssen für ein genügend kleines $\delta > 0$ drei Dinge beweisen:

1. T bildet für $|u_0| < \delta$ den Raum $C^\alpha(u_0)$ in sich ab.
2. T ist eine starke Kontraktion.
3. Der Fixpunkt u hat die gewünschten Eigenschaften.

1.) T bildet den Raum $C^\alpha(u_0)$ in sich ab. Dazu müssen wir die drei Eigenschaften nachprüfen, nämlich die Stetigkeit von Tu , die Wachstumsschranke und schließlich die Anfangsbedingung. Die Stetigkeit von Tu ist klar, sofern die Integrale existieren. Auch die letzte Eigenschaft ist offensichtlich:

$$P^+ Tu(0) = P^+ E(P^+ A, 0) u_0 + P^+ \int_{-\infty}^0 E(Q^+ A, -s) Q^+ g(u(s)) ds.$$

Dies ist gleich $P^+ u_0$. Bleibt die Beschränktheit von Tu zu zeigen. Dazu schätzen wir ab:

$$|Tu(t)| \leq \|e^{P^+ A t}\| |u_0| + \int_t^0 \|e^{P^+ A(t-s)}\| \|P^+\| L(\eta) |u(s)| ds + \int_{-\infty}^t \|e^{Q^+ A(t-s)}\| \|Q^+\| L(\eta) |u(s)| ds.$$

Einsetzen ergibt (Dabei beachte man, dass im zweiten Integral die Zeitdifferenz positiv, im dritten negativ ist.)

$$|Tu(t)| \leq M e^{\alpha t} |u_0| + M L(\eta) \max\{\|P^+\|, \|Q^+\|\} \left(\int_t^0 e^{3\alpha(t-s)} |u(s)| ds + \int_{-\infty}^t e^{\alpha(t-s)} |u(s)| ds \right).$$

Wegen der Wachstumsbeschränkung in C^α kann man weiter abschätzen

$$|Tu(t)| \leq M e^{3\alpha t} |u_0| + M L(\eta) \eta \max\{\|P^+\|, \|Q^+\|\} \left(\int_t^0 e^{3\alpha(t-s)} e^{2\alpha s} ds + \int_{-\infty}^t e^{\alpha(t-s)} e^{2\alpha s} ds \right).$$

Wir betrachten zunächst das zweite Integral, es liefert folgenden Beitrag:

$$e^{3\alpha t} \int_t^0 e^{-3\alpha s} e^{2\alpha s} ds = e^{3\alpha t} \frac{1}{-\alpha} (1 - e^{-\alpha t}).$$

Dies ergibt als obere Abschätzung für das erste Integral

$$\frac{1}{\alpha}(e^{2\alpha t} - e^{3\alpha t}).$$

Für das zweite Integral erhält man

$$e^{\alpha t} \int_{-\infty}^t e^{\alpha s} ds \leq \frac{1}{\alpha} e^{2\alpha t}.$$

Zusammen ergibt sich die endgültige Abschätzung

$$\|Tu(t)\| \leq M e^{3\alpha t} |u_0| + ML(\eta)\eta \frac{1}{\alpha} e^{2\alpha t} - \frac{ML(\eta)\eta}{\alpha} e^{3\alpha t}.$$

Mit $\delta < \frac{L(\eta)\eta}{\alpha}$ und der Wahl von η erhält man

$$|Tu(t)| \leq \eta e^{2\alpha t}.$$

Damit haben wir den ersten Schritt abgeschlossen.

2.) Seien $u_1, u_2 \in C^\alpha(u_0)$. Wir müssen den Abstand $d^\alpha(Tu_1, Tu_2)$ kontrollieren. Also

$$d^\alpha(Tu, Tv) = \eta \sup \{|Tu(t) - Tv(t)| e^{-2\alpha t} \mid t \leq 0\}.$$

Die Differenz $Tu(t) - Tv(t)$ hat die Form

$$Tu(t) - Tv(t) = \int_0^t e^{P^+ A(t-s)} P^+ (g(u(s)) - g(v(s))) ds + \int_{-\infty}^t e^{Q^+ A(t-s)} Q^+ (g(u(s)) - g(v(s))) ds.$$

Übergang zu den Normen und die grundlegenden Abschätzungen ergeben

$$|Tu(t) - Tv(t)| \leq ML(\eta) \left(\|P^+\| \int_t^0 e^{3\alpha(t-s)} |u(s) - v(s)| ds + \|Q^+\| \int_{-\infty}^t e^{\alpha(t-s)} |u(s) - v(s)| ds \right).$$

Wir betrachten wieder die beiden Integrale getrennt und multiplizieren zunächst mit $\eta e^{-2\alpha t}$. Für das erste Integral erhalten wir

$$e^{-2\alpha t} \int_t^0 e^{3\alpha(t-s)} e^{-2\alpha s} e^{2\alpha s} |u(s) - v(s)| ds \leq e^{\alpha t} \int_t^0 e^{-\alpha s} ds d^\alpha(u, v).$$

Damit ergibt sich für das erste Integral die Abschätzung

$$e^{-2\alpha t} \int_t^0 e^{3\alpha(t-s)} e^{-2\alpha s} e^{2\alpha s} |u(s) - v(s)| ds \leq \frac{1}{\alpha} d^\alpha(u, v).$$

Für das zweite erhalten wir

$$e^{-2\alpha t} \int_{-\infty}^t e^{\alpha(t-s)} |u(s) - v(s)| ds.$$

Wie oben ergibt sich dafür

$$\int_{-\infty}^t e^{2\alpha(t-s)} ds d^\alpha(u, v) \leq \frac{1}{\alpha} d^\alpha(u, v).$$

Insgesamt haben wir

$$\begin{aligned} d^\alpha(Tu, Tv) &\leq ML(\eta) \max\{\|P^+\|, \|Q^+\|\} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha}\right) d^\alpha(u, v) \\ &< 2 \frac{ML(\eta)}{\alpha} \max\{\|P^+\|, \|Q^+\|\} d^\alpha(u, v). \end{aligned}$$

Nach der Wahl von $L(\eta)$ ist damit

$$d^\alpha(Tu, Tv) \leq \frac{1}{2} d^\alpha(u, v)$$

und T ist eine starke Kontraktion.

3.) Sei $Tu = u$. Wir müssen zeigen, dass u die Differentialgleichung löst, und das richtige Verhalten für $t \rightarrow -\infty$ zeigt. Letzteres ist aufgrund der Definition von C^α klar. Dass u die Differentialgleichung löst folgt aus der Invarianz der Unterräume und der Tatsache, dass man die Differentialgleichung in ein gekoppeltes System auf den Unterräumen äquivalent umschreiben kann. Wir rechnen nach $\dot{u} + \frac{d}{dt}(Tu)(t)$ und erhalten

$$\dot{u} = Ae^{P^+At}u_0 + P^+g(u(t)) + A \int_0^t e^{P^+A(t-s)}P^+g(u(s))ds + Q^+g(u(t)) + A \int_{-\infty}^t e^{Q^+A(t-s)}Q^+g(u(s))ds.$$

Die rechte Seite ergibt

$$Ae^{P^+At}u_0 + g(u(t)) + A \left(\int_0^t e^{P^+A(t-s)}P^+g(u(s))ds + \int_{-\infty}^t e^{Q^+A(t-s)}Q^+g(u(s))ds \right) = Au(t) + g(u(t)).$$

□

Bemerkung 6.1.16 Die dritte Aussage, die wir im ersten Satz über Spektrum und Stabilität (im linearen Fall) gemacht haben, hat keine Übertragung auf die gegenwärtige Situation. Hat A Eigenwerte auf der imaginären Achse, so kann u_0 asymptotisch stabil, stabil aber nicht asymptotisch stabil oder auch instabil sein. Drei triviale Fälle, die dies erläutern, sind $\dot{u} = -u^3$, $\dot{u} = 0$ und schließlich $\dot{u} = u^2$. Im ersten Fall ist $u_0 = 0$ asymptotisch stabil, im zweiten stabil, aber nicht asymptotisch stabil, und im dritten Fall instabil.

Definition 6.1.17 Sei $\dot{u} = f(u)$ wie im Satz und w_0 eine Ruhelage, so dass $A = Df(w_0)$ keine Eigenwerte auf der imaginären Achse hat, so nennt man die Ruhelage **hyperbolisch**.

Diesen Begriff motiviert das Phasenporträt der Gleichung $\dot{x} = x, \dot{y} = -y$.

Beispiel 6.1.18 (Lorenz Gleichungen) Wir betrachten das dreidimensionale System

$$(6.1.19) \quad \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = f(x, y, z) = \begin{pmatrix} \sigma(y - x) \\ rx - y - xz \\ xy - bz \end{pmatrix}.$$

Dabei seien b, r, σ drei positive reelle Zahlen. Für Ruhelagen erhält man aus der ersten Gleichung $x = y$. Damit ergibt die zweite Gleichung $(r - 1 - z)x = 0$. Die Lösungen dieser Gleichung sind $x = 0$ und $z = r - 1$. Mit der dritten Gleichung erhält man schließlich $x^2 = bz$. Damit ergibt sich als Lösung $x = y = z = 0$ oder

$$x = y, z = r - 1, x = \pm\sqrt{b(r - 1)}.$$

Damit erkennt man, dass die nichttriviale Lösung nur für $r > 1$ existiert. Für $r < 1$ hat man also nur die triviale Lösung $x = y = z = 0$, und für $r > 1$ hat man neben dieser trivialen Lösung noch zwei weitere Lösungen. Wir werden die Stabilität der trivialen Lösung ausrechnen. Als Linearisierung bei $x = y = z = 0$ ergibt sich die Matrix

$$(6.1.20) \quad A = \begin{pmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ r & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{pmatrix}.$$

Das Spektrum kann man leicht ausrechnen: Man hat einen Eigenwert $-b < 0$. Um die Vorzeichen der anderen beiden zu diskutieren, betrachten wir

$$\det A = \sigma(1 - r) \text{ und } \operatorname{tr} A = -1 - \sigma < 0.$$

Also ist für $r < 1$ die triviale Ruhelage asymptotisch stabil. Bei $r = 1$, dort wo weitere Lösungen entstehen, verliert diese Lösung die Stabilität, sie wird instabil. Um die Stabilität der neuen Ruhelagen zu bekommen, geben wir zunächst die Linearisierung A von f in einem Punkt (x_0, y_0, z_0) an:

$$(6.1.21) \quad A = \begin{pmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ r - z_0 & -1 & -x_0 \\ y_0 & x_0 & -b \end{pmatrix}.$$

Die charakteristische Gleichung für diese Eigenwerte lautet

$$\lambda^3 + (\sigma + b + 1)\lambda^2 + b(\sigma + r)\lambda + 2\sigma b(r - 1) = 0.$$

Man rechnet nach, dass für

$$r < \frac{\sigma(\sigma + b + 3)}{\sigma - b - 1}$$

alle Realteile für die nichttriviale Lösung negativ sind. Für $\sigma = 10$ und $b = \frac{8}{3}$ hat man die Stabilität für $1 < r < \frac{470}{19}$. Dort werden auch die nichttrivialen Lösungen instabil. Weitere interessante Phänomene treten auf.

Beispiel 6.1.22 Ist w_0 eine Ruhelage einer autonomen Differentialgleichung und gibt es eine Umgebung $B_\varepsilon(w_0)$, so dass für jedes $u_0 \in B_\varepsilon(w_0)$ gilt $\omega(u_0) = w_0$, so folgt nicht, dass w_0 asymptotisch stabil ist. Man beachte, dass bei der Definition der asymptotischen Stabilität die Stabilität gefordert wurde. Ein Beispiel für dieses Phänomen liefert Aufgabe 3, Blatt 10. In Abbildung 6.2 sehen wir ein qualitatives Phasenportrait, das das beschriebene Phänomen illustriert.

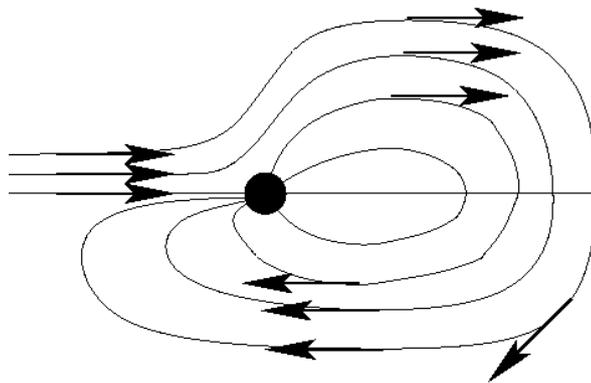


Abbildung 6.2: Ein Beispiel einer attraktiven Ruhelage, die nicht asymptotisch stabil ist. Typisch ist das Auftreten von homoklinen Orbits.

6.2 Die Stabilität einer periodischen Lösung

Sei wieder $\dot{u} = f(u)$ die autonome Differentialgleichung (5.1.1) mit einer Lipschitz-stetigen rechten Seite. In diesem Abschnitt betrachten wir einen geschlossenen Orbit \mathcal{O} für (5.1.1) und eine Lösung $u(t)$ in diesem Orbit. Wie im vorigen Abschnitt für eine Ruhelage wollen wir auch hier den Begriff der Stabilität definieren und Kriterien für verschiedene Formen der Stabilität angeben. Hier ist die Situation naturgemäß etwas komplizierter als im Fall einer Ruhelage.

Definition 6.2.1 Der geschlossene Orbit \mathcal{O} heißt **orbital stabil**, wenn \mathcal{O} als Menge stabil im Sinne der Definition 5.1.27 ist. Er wird als **orbital asymptotisch stabil** bezeichnet, wenn er stabil und attraktiv im Sinne der Definition 5.1.28 ist. Man nennt u **orbital asymptotisch stabil mit asymptotischer Phase**, wenn \mathcal{O} asymptotisch stabil ist und es eine Umgebung U von \mathcal{O} gibt, so dass zu jedem Anfangswert $u_0 \in U$ eine Zahl $T(u_0)$ gibt, so dass

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |u(t - T(u_0)) - u(t, t_0)| = 0$$

ist.

Ein geometrischer Zugang zur Stabilitätstheorie periodischer Lösungen geht auf Poincaré zurück. Zunächst konstruiert man sich den sogenannten Poincaré-Schnitt und die

Poincaré-Abbildung. Dabei geht man von der Beobachtung aus, dass jeder Punkt auf einem geschlossenem Orbit regulärer Punkt ist und somit eine Transversale existiert.

Lemma 6.2.2 Sei L eine Transversale zum Lipschitz-stetigen Vektorfeld f in einem Punkt u_0 auf einem geschlossenem Orbit \mathcal{O} . Dann gibt es eine Umgebung U_0 von u_0 , so dass zu jedem Punkt $v \in U_0 \cap L$ ein $t_v > 0$ existiert, so dass $u(t_v, v) \in L$ ist, aber für $t \in (0, t_v)$ die Lösung $u(t, v) \notin L$ ist.

Beweis. Folgt sofort aus dem Satz über stetige Abhängigkeit von Anfangswerten. \square

Definition 6.2.3 Eine Transversale L , wie sie im vorherigen Lemma angegeben war, heißt **Poincaré-Schnitt**. Die Abbildung $\Pi : L \cap U_0 \rightarrow L : v \mapsto u(t_v, v)$ nennt man **Poincaré-Abbildung** oder auch **Wiederkehrabbildung**, engl. first return map.

Ein alternativer Beweis von Lemma 6.2.2 beruht auf dem Satz über implizite Funktionen, damit erhält man auch eine etwas stärkere Aussage.

Satz 6.2.4 Ist $f \in C^1(U)$, so existiert eine Umgebung U_0 von u_0 , so dass $\Pi : L \cap U_0 \rightarrow L$ stetig differenzierbar ist.

Beweis. Folgt sofort aus dem Satz über implizite Funktionen: Man wähle eine affine Transversale $u_0 + H$, so ist für jeden Punkt v nahe u_0 der affine Raum $v + H$ eine Transversale und man hat eine stetig differenzierbare Abbildung π einer Umgebung V nach \mathcal{O} durch

$$u + H \ni v \mapsto u.$$

Wir betrachten für w nahe u_0 und t nahe t_{u_0} die Abbildung $Q(w, t) = \pi \circ \Phi(w, t)$, wobei Φ der zu f gehörende Fluss ist. Dann ist Q stetig differenzierbar, $Q(u_0, t_{u_0}) = u_0$ und

$$Q_t(u_0, t_{u_0}) = D_w \pi \circ \Phi_t(u_0, t_{u_0}) = D_w \pi f(u_0) \neq 0.$$

Damit garantiert der Satz über implizite Funktionen die lokale Lösbarkeit der angegebenen Gleichung und damit die Behauptung des Satzes. \square

Die Poincaré-Abbildung gibt uns ein einfaches geometrisches Kriterium für die Stabilität einer periodischen Lösung, das auch für theoretische Untersuchungen von Bedeutung ist.

Satz 6.2.5 Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ Lipschitz-stetig, \mathcal{O} ein geschlossener Orbit der Differentialgleichung $\dot{u} = f(u)$, u_0 ein (regulärer) Punkt auf \mathcal{O} . Sei L ein Poincaré-Schnitt mit Poincaré-Abbildung Π . Dann gilt:

1. Gibt es zu jedem $\varepsilon > 0$ ein $\delta > 0$, dass $w \in L$ und $|w - u_0| < \delta$ implizieren, so dass die Iterierten $\Pi^n(w)$ für alle $n \in \mathbb{N}$ definiert sind und gilt $|\Pi^n(w) - u_0| < \varepsilon$ für alle $n \in \mathbb{N}$, so ist \mathcal{O} orbital stabil.

2. Ist \mathcal{O} orbital stabil und gibt es eine Umgebung U_1 von u_0 , so dass aus $w \in U_1$ folgt, dass $\Pi^n(w)$ für alle $n \in \mathbb{N}$ definiert ist und für $n \rightarrow \infty$ gegen u_0 konvergiert, so ist \mathcal{O} orbital asymptotisch stabil.
3. Gibt es ein w , so dass $\Pi^{-n}(w)$ für alle $n \in \mathbb{N}$ existieren und gegen u_0 für $n \rightarrow -\infty$ konvergieren so ist \mathcal{O} instabil.

Beweis. Dies folgt aus der stetigen Abhängigkeit von Anfangswerten. Um dies zu sehen, müssen wir beachten, dass es eine Umgebung gibt, auf der die Rückkehrzeit durch $2t_{u_0} \geq t_w \geq \frac{1}{2}t_{u_0}$ nach oben bzw. unten beschränkt ist. \square

Um ein eher algebraisches Kriterium zu erhalten, müssen wir uns noch einmal Gedanken über Übergangsmatrizen machen.

Definition 6.2.6 Sei $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig, in der ersten Komponente Lipschitz stetig mit $f(0, t) = 0$. Die Ruhelage $u = 0$ der Gleichung (2.1.2) nennt man **stabil**, wenn zu jedem $\varepsilon > 0$ ein $\delta(t_0, \varepsilon) > 0$ existiert, so dass aus $|u_0| < \delta$ folgt, dass $|u(t, t_0, u_0)| < \varepsilon$ für alle $t > t_0$. Kann δ unabhängig von t_0 aus einer Menge $S \subset \mathbb{R}$ gewählt werden, so spricht man von **gleichmäßiger Stabilität bezüglich S** . Entsprechend definiert man **asymptotisch stabil**, wenn es ein $\delta_1(t_0) > 0$ gibt, so dass aus $|u_0| < \delta_1(t_0)$ folgt $u(t, t_0, u_0) \rightarrow 0$. Man nennt u_0 **instabil**, wenn es nicht stabil ist. Bei der Definition gleichmäßiger asymptotischer Stabilität (bezüglich S) verlangt man, dass 0 stabil und asymptotisch stabil ist und die Zahl $\delta_1 = \delta_1(t_0)$ unabhängig von $t_0 \in S$ gewählt werden kann und schließlich zu jeder positiven Zahl $\eta > 0$ eine Zeit $T(\eta)$ gefunden werden kann, so dass für alle $t_0 \in S$ und alle u_0 mit $|u_0| < \delta_1$ für alle $t > t_0$ gilt, dass $|u(t + T(\eta), t_0, u_0)| < \eta$. Man überträgt diese Begriffe auf beliebige Lösungen, indem man für eine Lösung $u(t)$ das System $\dot{y} = f(u(t) + y, t) - f(u(t), t)$ betrachtet.

Lemma 6.2.7 Alle Lösungen von $\dot{u} = A(t)u$ haben die gleichen Stabilitätseigenschaften.

Beweis. Folgt aus der Linearität. \square

Bemerkung 6.2.8 Aus diesem Grund sagt man auch, das System (3.3.4) $\dot{u} = A(t)u$ ist stabil, asymptotisch stabil oder instabil.

Satz 6.2.9 Sei $A : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ stetig. Sei $\Psi(t)$ eine Fundamentalmatrix für $\dot{u} = A(t)u$ und β sei eine beliebige reelle Zahl. Dann ist das System $\dot{u} = A(t)u$

1. stabil genau dann, wenn es zu jedem $t_0 \in \mathbb{R}$ eine Konstante $K(t_0)$ gibt mit $\|\Psi(t)\| \leq K(t_0)$ für alle $t \geq t_0$,
2. gleichmäßig stabil für $t_0 \geq \beta$ genau dann, wenn es eine Konstante $K(\beta)$ gibt, so dass für $t_0 \geq \beta$ und $t_0 \leq s \leq t$ gilt

$$\|\Psi(t)\Psi(s)^{-1}\| \leq K(\beta),$$

3. *asymptotisch stabil genau dann, wenn*

$$\|\Psi(t)\| \rightarrow 0 \text{ für } t \rightarrow \infty.$$

4. *gleichmäßig asymptotisch stabil für $t_0 \geq \beta$ genau dann, wenn es Konstanten $K = K(\beta) > 0$, $\alpha = \alpha(\beta) > 0$ gibt mit*

$$\|\Psi(t)\Psi(s)^{-1}\| \leq Ke^{-\alpha(t-s)}, \text{ für } \beta \leq s \leq t < \infty.$$

Beweis. 1.) Die Rückrichtung folgt einfach aus der Darstellung der Lösung: Sei $u(t)$ eine Lösung, so ist $u(t) = \Psi(t)\Psi(t_0)^{-1}u(t_0)$. Sei $M = |\Psi(t_0)^{-1}|$. Dann ist $|u(t)| \leq K(t_0)M |u(t_0)|$. Wählt man $\delta = \frac{\varepsilon}{K(t_0)M}$, so hat man die Stabilitätsbedingung erfüllt. Die Hinrichtung ist auch nahezu offensichtlich: Stabilität besagt, dass zu jedem $\varepsilon > 0$ ein $\delta > 0$ existiert, so dass für jedes $u_0 \in \mathbb{R}^n$, $|u_0| < \delta$ die Norm $|\Psi(t)\Psi(t_0)^{-1}u_0| < \varepsilon$ beschränkt bleibt. Angenommen es gäbe Folgen u_ν , t_ν , so dass

$$\Psi(t_\nu)u_\nu \rightarrow_{\nu \rightarrow \infty} \infty$$

konvergiert. Dann hat $\tilde{u}_\nu = \frac{1}{2}\delta \frac{1}{|\Psi(t_0)u_\nu|} \Psi(t_0)u_\nu$ die Norm $\frac{\delta}{2}$ und $|\Psi(t_\nu)\Psi(t_0)^{-1}\tilde{u}_\nu| \geq \varepsilon$ für genügend großes ν .

2.) Beide Richtungen können wie im ersten Teil durchgeführt werden, hier hängt δ für $t_0 \geq \beta$ nicht von t_0 ab.

3.) Als erstes folgt aus der Abklingbedingung die Beschränktheit von $\|\Psi(t)\|$ und damit die Stabilität. Die Asymptotik erhält man wie im ersten Beweisschritt. Die Umkehrung folgt auch wie oben.

4.) Ist die angegebene Bedingung erfüllt, so konvergiert $\|\Psi(t)\| \rightarrow 0$ für $t \rightarrow \infty$ und aus 2.) folgt die Stabilität. Aus dem dritten Schritt erhält man die asymptotische Stabilität. Sei $|u(t_0)| \leq 1$ und $\eta \in (0, K)$. Setze

$$T = -\frac{\log(\eta/K)}{\alpha}.$$

Dann ist für $t \geq t_0 + T$, $t' = t - (T + t_0) > 0$

$$|u(t)| = |\Psi(t)\Psi(t_0)^{-1}u(t_0)| \leq Ke^{-\alpha(t-t_0)}|u(t_0)| = Ke^{-\alpha T}e^{-\alpha t'}|u(t_0)| < Ke^{-\alpha T} = \eta.$$

Hier ist die Umkehrung schwieriger. Wir nehmen also an, dass die Nulllösung gleichmäßig asymptotisch stabil für $t_0 \geq \beta$ ist. Insbesondere existiert ein $b > 0$, so dass zu jedem $\eta < b$ ein $T = T(\eta)$ existiert mit

$$|\Psi(t)\Psi(t_0)^{-1}u(t_0)| \leq \eta, \quad t \geq t_0 + T, \quad t_0 > \beta, \quad |u(t_0)| < b.$$

Daher ist (warum kann man so abschätzen?)

$$\|\Psi(t+T)\Psi(t_0)^{-1}\| < \frac{\eta}{b} < 1 \quad \text{für } t \geq t_0 \geq \beta.$$

Aufgrund der Definition von gleichmäßiger asymptotischer Stabilität gilt eine entsprechende Abschätzung für alle $t \geq \beta$, d.h.

$$\|\Psi(t+T)\Psi(t)^{-1}\| < \frac{\eta}{b} < 1 \text{ für } t \geq \beta.$$

Aufgrund der gleichmäßigen Stabilität existiert ein $M = M(\beta)$ mit

$$\|\Psi(t)\Psi(s)^{-1}\| \leq M, \text{ für } \beta \leq s \leq t < \infty.$$

Setze

$$\alpha = -T^{-1} \log\left(\frac{\eta}{b}\right)$$

und

$$K = Me^{\alpha T}.$$

Dann gibt es zu jedem $t \geq t_0$ ein $k \in \mathbb{N}_0$ mit $kT \leq t - t_0 < (k+1)T$. Daher gilt dann

$$\begin{aligned} \|\Psi(t)\Psi(t_0)^{-1}\| &= \|\Psi(t)\Psi(t_0+kT)^{-1}\Psi(t_0+kT)\Psi(t_0)^{-1}\| \\ &\leq \|\Psi(t)\Psi(t_0+kT)^{-1}\| \|\Psi(t_0+kT)\Psi(t_0)^{-1}\| \\ &\leq M \|\Psi(t_0+Tk)\Psi(t_0)^{-1}\| \\ &\leq M \|\Psi(t_0+Tk)\Psi(t_0+(k-1)T)^{-1}\Psi(t_0+(k-1)T)\Psi(t_0)^{-1}\| \\ &\leq M \frac{\eta}{b} \|\Psi(t_0+(k-1)T)\Psi(t_0)^{-1}\| \\ &\quad \vdots \\ &\leq M \left(\frac{\eta}{b}\right)^k \\ &\leq Me^{-\alpha kT} \\ &= Ke^{-\alpha(k+1)T} \\ &\leq Ke^{-\alpha(t-t_0)} \end{aligned}$$

Dies vervollständigt den Beweis. □

Wir betrachten nun die homogene, lineare Gleichung

$$(6.2.10) \quad \dot{u} = A(t)u$$

mit der zusätzlichen Eigenschaft

$$\exists T > 0 \text{ mit } A(t+T) = A(t) \forall t \in \mathbb{R},$$

wobei $A : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ oder $A : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{C}^n, \mathbb{C}^n)$ eine stetige Abbildung ist. Der Zusammenhang mit periodischen Lösungen wird in Kürze klar werden.

Lemma 6.2.11 *Zu jeder komplexen $n \times n$ Matrix $A \in \mathcal{L}(\mathbb{C}^n, \mathbb{C}^n)$ mit $\det A \neq 0$ gibt es eine Matrix $B \in \mathcal{L}(\mathbb{C}^n, \mathbb{C}^n)$ mit $e^B = E(B, 1) = A$.*

Beweis. Ist $e^B = A$, so gilt für jede nichtsinguläre Matrix C

$$e^{C^{-1}BC} = C^{-1}AC.$$

Daher ist es keine Beschränkung der Allgemeinheit, wenn wir annehmen, dass A in jordanischer Normalform gegeben ist. Also hat A die Gestalt (3.1.3) mit Jordan Blöcken der Form (3.1.4). Jeden Block der Form (3.1.4) schreiben wir in der Gestalt

$$\mathcal{B}_k = \lambda_k \mathbb{1} + N_k,$$

wobei N_k der nilpotente Anteil ist. Aufgrund der Annahme, dass die Determinante von A von Null verschieden ist, ist auch $\lambda_k \neq 0$. Wir geben nun eine Matrix B_k an, so dass $e^{B_k} = \mathcal{B}_k$ ist. Wir schreiben \mathcal{B}_k in der Form $\mathcal{B}_k = \lambda_k(\mathbb{1} + \frac{1}{\lambda_k}N_k)$. Dann ist (für einen geeigneten Zweig des Logarithmus) $B_k = (\log \lambda_k)\mathbb{1} + S_k$ mit

$$S_k = - \sum_{j=1}^n \frac{(-1)^j}{j\lambda^j} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \end{pmatrix}^j.$$

Einsetzen in die Potenzreihe gibt das gewünschte Resultat. □

Bemerkung 6.2.12 Man beachte, dass Lemma 6.2.11 nicht für $A, B \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$, det $A \neq 0$ gilt.

Satz 6.2.13 (Floquet) Sei $A : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ stetig und T -periodisch. Jede Fundamentalmatrix der Gleichung $\dot{u} = A(t)u$ hat die Form

$$\Psi(t) = P(t)E(B, t),$$

wobei B eine konstante und P eine T -periodische Matrix ist.

Beweis. Ist $\Psi(t)$ eine Fundamentalmatrix, so ist $\Psi(t+T)$ auch eine Fundamentalmatrix. Daher gibt es eine nichtsinguläre Matrix C , so dass für alle $t \in \mathbb{R}$

$$\Psi(t+T) = \Psi(t)C$$

gilt. C hat dann aufgrund der Flusseigenschaft die Darstellung $C = \Psi(T)$. Nach Lemma 6.2.11 gibt es eine Matrix B mit $e^{TB} = C$. Setze

$$P(t) = \Psi(t)E(B, -t).$$

Dann hat man

$$P(t+T) = \Psi(t+T)E(B, -(t+T)) = \Psi(t)E(B, T)E(B, -(t+T)) = P(t).$$

□

Korollar 6.2.14 (Transformation auf konstante Koeffizienten)

Zu T -periodischem $A : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ gibt es eine nichtsinguläre periodische Koordinatentransformation $P : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$, welche die Gleichung $\dot{u} = A(t)u$ in eine Gleichung mit konstanten Koeffizienten überführt.

Beweis. Seien P, B wie im Satz 6.2.13. Wir setzen $w = (P(t))^{-1}u$. Die Differentialgleichung für w ist dann mit

$$\frac{d}{dt}P(t)w = \dot{P}w + P\dot{w} = \dot{u} = Au$$

und damit

$$\dot{w} = P(t)^{-1}(A(t)P(t) - \dot{P}(t))w.$$

Da $P(t) = \Psi(t)E(B, -t)$ ist, hat man $\dot{P} = A(t)P(t) - P(t)B$. Einsetzen gibt

$$\dot{w} = P(t)^{-1}(A(t)P(t) - A(t)P(t) + P(t)B) = Bw.$$

Die rechte Seite hängt nicht von t ab. □

Definition 6.2.15 Gegeben sei das homogene, lineare System (3.3.4) $\dot{u} = A(t)u$ mit T -periodischem $A : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$. Dann heißt eine Matrix C , die für eine Fundamentalmatrix $\Psi(t)$ des angegebenen Systems der Beziehung

$$\Psi(t+T) = \Psi(t)C$$

genügt, eine **Monodromiematrix** von (3.3.4). Die Eigenwerte ρ_j einer Monodromiematrix heißen **charakteristische Multiplikatoren** oder auch **Floquetmultiplikatoren**² von (3.3.4). Ist ρ ein charakteristischer Multiplikator und $\rho = e^{\lambda T}$, so wird λ als **charakteristischer Exponent** oder **Floquetexponent** bezeichnet. bezeichnet.

Lemma 6.2.16 Eine komplexe Zahl λ ist charakteristischer Exponent der Gleichung (3.3.4) mit einer T -periodischen rechten Seite A , falls das System (3.3.4) eine nichttriviale Lösung $p(t)e^{\lambda t}$ besitzt, wobei p periodisch mit Periode T ist. Speziell gibt es genau dann eine nichttriviale Lösung $u(t)$ mit Periode T (bzw. $2T$), wenn es den Multiplikator 1 (bzw. -1) gibt.

Beweis. Sei $e^{\lambda t}p(t)$ eine solche Lösung. Dann gibt es ein u_0 und eine Fundamentalmatrix $\Psi(t)$ mit $e^{\lambda t}p(t) = \Psi(t)u_0$. Nach dem Satz von Floquet 6.2.13 kann $\Psi(t)$ in der Form $P(t)E(B, t)$ geschrieben werden. Also ist $e^{\lambda t}p(t) = P(t)E(B, t)u_0$. Da $P(t+T) = P(t)$ und $p(t+T) = p(t)$ für alle $t \in \mathbb{R}$ ist, hat man

$$e^{\lambda(t+T)}p(t+T) = P(t+T)E(B, t+T)u_0,$$

²Achille Marie Gaston Floquet (15.12.1847-7.10.1920) war ab 1873 Professor in Belfort, Angers und Clermont-Ferrand ab 1890 Professor für Analysis an der Universität Nancy. Er beschäftigte sich mit Astronomie, Differentialgleichungen und periodischen Funktionen.

und daher ist

$$e^{\lambda t} e^{\lambda T} p(t) = P(t)E(B, t)E(B, T)u_0.$$

Also gilt

$$e^{\lambda T} P(t)E(B, t)u_0 = P(t)E(B, t)E(B, T)u_0.$$

Zusammen genommen ist

$$P(t)E(B, t) (E(B, T) - e^{\lambda T}) u_0 = 0.$$

Daher ist $\det (E(B, T) - e^{\lambda T} \mathbb{1}) = 0$. Für die Umkehrung beachtet man einfach, dass aus dem Verschwinden von $\det (E(B, T) - e^{\lambda T})$ die Existenz eines Vektors u_0 folgt mit

$$(E(B, T) - e^{\lambda T}) u_0 = 0.$$

Man kann sogar λ und u_0 so wählen, dass λ Eigenwert von B ist. Dann ist

$$E(B, t)u_0 = e^{\lambda t}u_0,$$

und $P(t)E(B, t)u_0$ ist die gewünschte Lösung. □

Lemma 6.2.17 Seien $\rho_j = e^{\lambda_j T}$ die charakteristischen Multiplikatoren. Dann ist

$$\prod_{j=1}^n \rho_j = \exp \left(\int_0^T \operatorname{tr} A(s) ds \right)$$

und

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = \frac{1}{T} \int_0^T \operatorname{tr} A(s) ds \bmod \left(\frac{2\pi i}{T} \right).$$

Beweis. Sei $\Psi(t)$ die Fundamentalmatrix mit Anfangswert $\Psi(0) = \mathbb{1}$. Dann ist

$$\det C = \det \Psi(T) = \exp \left(\int_0^T \operatorname{tr} A(s) ds \right).$$

Daraus folgt alles weitere. □

Als Hauptsatz über lineare periodische Systeme ergibt sich

Satz 6.2.18 (a) Das lineare, homogene periodische System $\dot{u} = A(t)u$ ist genau dann stabil, wenn alle charakteristischen Multiplikatoren betragsmäßig kleiner oder gleich eins sind und die, die dem Betrage nach eins sind, gleiche algebraische und geometrische Vielfachheit besitzen.

(b) Das System ist genau dann gleichmäßig asymptotisch stabil, wenn alle charakteristischen Multiplikatoren dem Betrage nach kleiner eins sind. In diesem Fall kann man eine Fundamentalmatrix abschätzen:

$$\exists K > 0, \alpha < 0 \text{ mit } t - s \geq 0 \implies \|\Psi(t)\Psi(s)^{-1}\| \leq K e^{-\alpha(t-s)}.$$

Beweis. Benutzt im wesentlichen die Ideen wie im autonomen Fall. \square

Als Stabilitätskriterium für geschlossene Orbits erhält man schließlich den

Satz 6.2.19 Sei \mathcal{O} ein geschlossener Orbit der autonomen Gleichung $\dot{u} = f(u)$, wobei die rechte Seite als genügend glatt vorausgesetzt werde. Dann ist \mathcal{O} genau dann orbital stabil, wenn das lineare homogene periodische System

$$(6.2.20) \quad \dot{y} = Df(u(t))y,$$

stabil ist, wobei $u(t)$ eine Lösung im Orbit \mathcal{O} ist.

Ohne vollständigen Beweis wollen wir noch ein Kriterium für orbital asymptotische Stabilität angeben.

Satz 6.2.21 \mathcal{O} ist genau dann orbital asymptotisch stabil, wenn (6.2.20) stabil ist, 1 charakteristischer Multiplikator mit algebraischer Vielfachheit 1 ist und alle von 1 verschiedenen charakteristischen Multiplikatoren dem Betrage nach kleiner als 1 sind.

Beweis. (Skizze)

1. Die Eigenwerte von $D_u\Pi(u_0)$ sind gerade die charakteristischen Multiplikatoren, wobei die Vielfachheit von 1 um eins verringert ist.
2. Man benötigt das dem Satz 6.1.4 vom Spektrum und Stabilität II entsprechende Stabilitätskriterium für Abbildungen, dies wiederum entspricht der Aussage von Satz 6.1.4, nur ist jeweils $\operatorname{Re}\lambda < \Rightarrow 0$ durch $|\lambda| < \Rightarrow 1$ zu ersetzen.

\square

6.3 Lyapunov-Funktionen

Ein wichtiges Hilfsmittel bei der Bestimmung der Stabilität von Lösungen sind sogenannte Lyapunov-Funktionen. Sie verallgemeinern erste Integrale.

Definition 6.3.1 Es sei $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Lipschitz-stetige Funktion. Eine Funktion $w : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **erstes Integral**, falls w längs Lösungen der Gleichung $\dot{u} = f(u, t)$ konstant bleibt.

Kennt man eine hinreichende Zahl von (linear unabhängigen) ersten Integralen, so kann man die Differentialgleichung als gelöst ansehen. Eine wichtige Klasse von Systemen mit erstem Integral sind Hamiltonsche Systeme. Die Hamilton-Funktion H ist bereits das erste Integral.

Definition 6.3.2 Es sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, f Lipschitz-stetig auf U . Wir betrachten die Gleichung $\dot{u} = f(u)$. Sei $W \subset U$ offen. Eine Funktion $V : C^0(W, \mathbb{R})$ heißt **Lyapunov Funktion** auf W zu $\dot{u} = f(u)$, falls alle partiellen Ableitungen von V existieren und für alle $w \in W$ gilt

$$\langle \nabla V(w), f(w) \rangle \leq 0.$$

Eine unmittelbare Konsequenz dieser Forderung ist, dass für alle $w \in W$ gilt

$$\frac{d}{dt} V(u(t, u_0))|_{t=0} \leq 0.$$

Ist $W = U$, so gilt für jede Lösung $\frac{d}{dt} V(u(t)) \leq 0$.

Satz 6.3.3 Wir betrachten $\dot{u} = f(u)$ mit Ruhelage $u = 0$. Gibt es eine Umgebung W von 0 und eine Lyapunov-Funktion V auf W mit $V \geq 0$ und $V(x) = 0$ genau dann, wenn $x = 0$, so ist u stabil. Ist $\dot{V}(u)|_{t=0} < 0$ für $u > 0$, so ist 0 asymptotisch stabil.

Beweis. Wir beweisen zunächst die Stabilitätsaussage. Zu zeigen ist also, dass zu jedem $\varepsilon > 0$ eine Zahl $\delta > 0$ existiert, so dass aus $|u_0| < \delta$ folgt, dass das maximale Existenzintervall vorwärts unbeschränkt ist und für alle $t \geq 0$ gilt $|u(t, u_0)| < \varepsilon$.

Sei $\varepsilon > 0$ vorgegeben, und $\varepsilon > \eta > 0$ gegeben. Es existiert eine Umgebung $B_\tau(u_0)$ mit

$$V(B_\tau(u_0)) \subset [0, \eta].$$

Sei

$$\mu = \inf \{V(x) \mid d(x, u_0) = \tau\}$$

und $r < \mu$. Dann ist die u_0 enthaltende Zusammenhangskomponente der Menge $V^{-1}[0, r)$ in der Menge $B_\tau(u_0)$ enthalten. Ist nun $\delta < \tau$, so ist für $u \in B_\delta(u_0)$ die Lösungskurve $(\varphi_t(u))_{t \geq 0, t \in I}$ auf ihrem maximalen Existenzintervall I in $B_\varepsilon(u_0)$ enthalten, was die Verwendung des Flusses (genauer gesagt, des Halbflusses) φ im Nachhinein rechtfertigt. Wir müssen jetzt lediglich zeigen, dass dieses maximale Existenzintervall nach rechts unbeschränkt ist. Um dies zu zeigen, betrachten wir $a(t) = V(\varphi_t(u))$ für $t \in I$. Es gilt $a(0) = V(u_0) < r < \mu$. Angenommen, es gibt ein t_0 mit $a(t_0) = \varepsilon$, dann gibt es ein $0 < t_1 < t_0$ mit $a(t_1) = \mu$. Wegen $\dot{a} \leq 0$ und $a(t_1) = \mu < \varepsilon = V(t_0)$ erhalten wir einen Widerspruch.

Im zweiten Fall müssen wir noch zeigen: $\varphi_t(u) \rightarrow u_0$ für $t \rightarrow \infty$. Angenommen, dies ist nicht der Fall. Dann ist klar: $V(t)$ ist streng monoton fallend und nach unten beschränkt, also konvergent. Angenommen $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) = c > 0$. Dann ist $\omega(u)$ nichtleer und $u_0 \notin \omega(u)$. Außerdem ist V konstant auf $\omega(u)$. Enthält $\omega(u)$ einen regulären Punkt, ist dort aber $\dot{V} < 0$. Also enthält $\omega(u)$ keinen regulären Punkt. Für einen kritischen Punkt x in $\omega(u)$ gilt:

$$\frac{d}{dt}_{t=0} V(\varphi_t(x)) = \nabla V \cdot \frac{d}{dt} \varphi_t(x) = 0$$

und damit $x = 0$. □

Nebenbei haben wir noch gezeigt:

Korollar 6.3.4 *Unter den Voraussetzungen von Teil (a) des letzten Satzes gilt: Sei R die Menge $\dot{V} = 0$ und M die größte invariante Menge in R , so ist für jedes $u \in W$ die Grenzmenge $\omega(u) \subset M$.*

Der Beweis des Satzes 5.4.3 liefert auch eine Aussage über Gradientensysteme.

Korollar 6.3.5 *Unter den Voraussetzungen von Teil (a) des letzten Satzes gilt: V ist auf Grenzmengen $\omega(u)$, $\alpha(u)$ konstant.*

Ohne Beweis wollen wir die sogenannten Umkehrsätze angeben.

Satz 6.3.6 (Umkehrsatz) *Die Existenz einer Lyapunov-Funktion mit den im Satz 6.3.3 angegebenen Eigenschaften ist notwendig für Stabilität bzw. für gleichzeitiges Auftreten von Stabilität und asymptotischer Stabilität einer Ruhelage.*

Beweis. Findet man z.B. im Buch von HARTMAN [?]. □

Beispiel 6.3.7 1. *Wir betrachten $\ddot{x} + g(x) = 0$, mit $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar und $g(0) = 0$. Das System ist äquivalent zu*

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -g(x).\end{aligned}$$

Setze

$$G(x) = \int_0^x g(s) ds$$

und

$$V(x, y) = \frac{y^2}{2} + G(x).$$

Dann ist $\dot{V} = 0$ und die Ruhelage $(x, y) = 0$ stabil, falls $xg(x) > 0$.

2. Für die entsprechende Gleichung mit Dämpfung findet man asymptotische Stabilität.

6.4 Die instabile Mannigfaltigkeit

In der Nähe regulärer Punkte hatten wir mit dem Begradigungssatz eine Art Normalform für den Fluss gefunden. Wir bereits darauf hingewiesen, dass es für kritische Punkte, also für Ruhelagen eine entsprechende Aussage nicht gibt. Daher muß man noch eine zusätzliche Voraussetzung machen um einen solche Satz beweisen zu können.

Definition 6.4.1 1. Eine Ruhelage heißt hyperbolisch, wenn alle Eigenwerte der Linearisierung nichtverschwindenden Realteil besitzen, d.h. für eine Ruhelage x_0 gilt

$$\lambda \in \sigma(Df(x_0)) \Rightarrow \operatorname{Re} \lambda \neq 0.$$

2. Eine periodische Lösung heißt hyperbolisch, wenn alle Floquetmultiplikatoren vom Betrag ungleich 1 sind.

Gegeben sei nun ein autonomes C^1 -Vektorfeld $v : M \rightarrow TM$ auf einer Riemannschen Mannigfaltigkeit (oder $U \subset \mathbb{R}^n$). Es sei u_0 eine hyperbolische Ruhelage. Es sei $k_s = \dim E_s$ und $k_u = \dim E_u$. Dann gilt der folgende Satz über die Existenz lokaler stabiler und instabiler Mannigfaltigkeiten.

Satz 6.4.2 (Lokale invariante Mannigfaltigkeiten) Es gibt eine Umgebung $V \subset U$ bzw. $V \subset M$ von u_0 und

1. eine C^1 -Mannigfaltigkeit $W_{loc}^s(u_0) \subset V$ mit $u_0 \in W_{loc}^s(u_0)$ und $T_{u_0}W^s(u_0) = E_s$, so dass für alle $v_0 \in V$ gilt

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u(t, v_0) = u_0.$$

2. eine C^1 -Mannigfaltigkeit $W_{loc}^u(u_0) \subset V$ mit $u_0 \in \tilde{W}^u(u_0)$ und $T_{u_0}\tilde{W}^s(u_0) = E_u$, so dass für alle $v_0 \in V$ gilt

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} u(t, v_0) = u_0.$$

Definition 6.4.3 Die Mannigfaltigkeit $W_{loc}^s(u_0)$ heißt eine lokal stabile Mannigfaltigkeit von u_0 . Entsprechend bezeichnet man die Mannigfaltigkeit $W_{loc}^u(u_0)$ als lokal instabile Mannigfaltigkeit.

Für den folgenden Satz nehmen wir an, dass wir entweder auf einer kompakten Mannigfaltigkeit M arbeiten, oder aber (in der Zeit) globale Existenz von Lösungen gewährleistet sei.

Definition 6.4.4 (Globale invariante Mannigfaltigkeiten) Es sei Φ der zu unserer Differentialgleichung gehörende Fluss, u_0 eine hyperbolische Ruhelage und $W^s(u_0)$, bzw. $W^u(u_0)$ seien lokal stabile, bzw. lokal instabile Mannigfaltigkeiten. Dann

Satz 6.4.5 (Globale invariante Mannigfaltigkeiten) Es seien

$$W^s(u_0) = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \Phi(W_{loc}^s(u_0), -k)$$

und

$$W^u(u_0) = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \Phi(W_{loc}^u(u_0), k).$$

Dann sind $W^s(u_0)$ und $W^k(u_0)$ Mannigfaltigkeiten.

Beweis. Folgt aus dem Satz 6.4.2 und der Tatsache, dass $\Phi(\cdot, k)$ für jedes $k \in \mathbb{Z}$ ein Diffeomorphismus ist. \square

Beweis des Satzes 6.4.2. Es reicht die Existenz von $W_{loc}^s(u_0)$ oder $W^u(u_0)$ zu beweisen. Wir beweisen letzteres. Satzes 6.1.14 garantiert zu jedem Punkt v_0 im instabilen Unterraum (der hinreichend nahe bei u_0 liegt) genau eine Lösung $u(t)$ mit $P^+u(0) = v_0$ und $\lim_{t \rightarrow -\infty} u(t) = u_0$, d.h. es existiert ein $\delta > 0$, so dass zu jedem $v_0 \in B_\delta(u_0) \cap E^+$ eine Lösung $u(t, w_0)$ existiert $P^+w_0 = v_0$ und $u(t, w_0) \rightarrow u_0$. Die Eindeutigkeit dieses Wertes w_0 folgt aus dem Beweis des Satzes. Wir setzen $h(v_0) = w_0$. Dann ist $W_{loc}^s(u_0) \cap B_\delta(u_0)$ der Graph von h und es reicht zu zeigen $h \in C^1$ und $Dh(u_0) = 0$. Man sieht relativ leicht, dass der Graph von h lokal invariant ist, d.h. zu jedem Startwert $v_0 = u_0 + w_0$ gibt es ein $\varepsilon > 0$, so dass für $|t| < \varepsilon$ die Lösung $u(t, v_0)$ auf dem Graphen von h liegt. Außerdem ist h stetig, wegen Satz 1.4.14.

6.5 Stabilitätsverlust und Verzweigungen

In diesem Abschnitt betrachten wir parameterabhängige gewöhnliche Differentialgleichungen und wollen untersuchen, wie sich Stabilitätsverlust auswirkt. Im ersten Unterabschnitt wollen wir annehmen, daß der Stabilitätsverlust einer Ruhelage durch die Bewegung eines reellen Eigenwertes über die imaginäre Achse zustande kommt. Im zweiten Abschnitt wollen wir ein vergleichbares Szenario für ein paar konjugiert komplexer Eigenwerte betrachten. Schließlich betrachten wir noch einfache Verzweigungen bei Familien von periodischen Lösungen.

6.5.1 Stationäre Verzweigungen

Sei

$$\dot{u} = f(u, \lambda)$$

eine autonome, parameterabhängige Differentialgleichung auf $W \subset \mathbb{R}^n$ mit einer Kurve $(u(s), \lambda(s))$ von Ruhelagen, d.h. $f(u(s), \lambda(s)) = 0$. Sei $A(s) = D_u f(u(s), \lambda(s))$. Bezüglich des Spektrums von $A(s)$ wollen wir voraussetzen:

1. $\ker A(0) \neq 0$.
2. der Eigenwert 0 von $A(0)$ ist geometrisch einfach und
3. es gibt eine Fortsetzung des Eigenwertes 0, d.h. es existiert eine Kurve $\sigma(\lambda(s))$ mit $\sigma(\lambda_0) = 0$ mit $\sigma'(\lambda_0)\lambda'(0) \neq 0$.

Um Struktur und parameterabhängige Veränderungen der Lösungsmenge von $f(u, \lambda) = 0$ aufklären zu können, schreiben wir die Gleichung um unter Ausnutzung von Eigenschaften der Matrix $A = A(0)$. Sei R der Bildraum von A und $K = \ker A$. Sei

$Q_1 : \mathbb{R}^n \rightarrow K$ ein Projektor und Q_2 ein komplementärer Projektor, d.h. $Q_1 + Q_2 = \mathbb{1}$. Ebenso wählen wir einen Projektor $P_1 : \mathbb{R}^n \rightarrow R$ und P_2 einen komplementären Projektor. Wir setzen für $u \in \mathbb{R}^n$

$$v = Q_1 u \text{ und } w = Q_2 u.$$

Damit erhalten wir das Gleichungssystem

$$\begin{aligned} P_1 f(v + w, \lambda) &= 0 \\ P_2 f(v + w, \lambda) &= 0. \end{aligned}$$

Ferner setzen wir $W = Q_2 \mathbb{R}^n$, $V = P_2 \mathbb{R}^n$ und beachten, daß damit das Gleichungssystem als Abbildung $F = K \times W \times \mathbb{R} \rightarrow R \oplus V$ geschrieben wird, mit $F = (F_1, F_2)$, $F_j = P_j f$.

Wir berechnen die Ableitung $D_w F_1(v, w, \lambda)$ bei $(v, w, \lambda) = (0, 0, 0)$:

$$D_w F_1(v, w, \lambda) = D_w P_1 F(Q_1 u + Q_2 u, \lambda) = P_1 D_w f(Q_2 u, \lambda) Q_2 = P_1 A Q_2.$$

Diese Matrix hat vollen Rang und mit dem Satz über implizite Funktionen (DIEUDONNE [?]) folgt, daß man lokal, d.h. in einer Umgebung, eine Auflösung der Gleichung $F_1(v, w, \lambda) = 0$ in der Form

$$w = w(v, \lambda)$$

finden kann. Wir setzen dies in die Gleichung $F_2 = 0$ ein und erhalten die sogenannte Verzweigungsgleichung

$$F_2(v, w(v, \lambda), \lambda) = 0.$$

Das bisher beschriebene Verfahren zur Reduktion des Problems auf eine Verzweigungsgleichung wird nach den beiden Mathematikern Lyapunov und E. Schmidt³ als Lyapunov-Schmidt-Verfahren bezeichnet.

Sattel-Knoten-Verzweigung

Die Begriffsbildung kommt von folgendem Bild 6.3, die zugehörige Differentialgleichung hat folgende Gestalt

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \lambda + x^2 \\ \dot{y} &= -y. \end{aligned}$$

In diesem System finden wir für $\lambda < 0$ einen Sattel und einen Knoten, die sich bei $\lambda = 0$ auslöschen. Dieses Beispiel mag als Grundlage für die nachfolgenden abstrakteren

³Erhard Schmidt (13.1.1876-6.12.1959) war Schüler von Hilbert. Er ist vor allem wegen des nach ihm benannten Orthogonalisierungsverfahren bekannt. Er arbeitete über Integralgleichungen und brachte die Funktionalanalysis vorwärts. In drei Arbeiten aus den Jahren 1906-1908 tauchte das hier vorgestellte Verfahren zur Untersuchung der Verzweigungen bei Integralgleichungen auf.

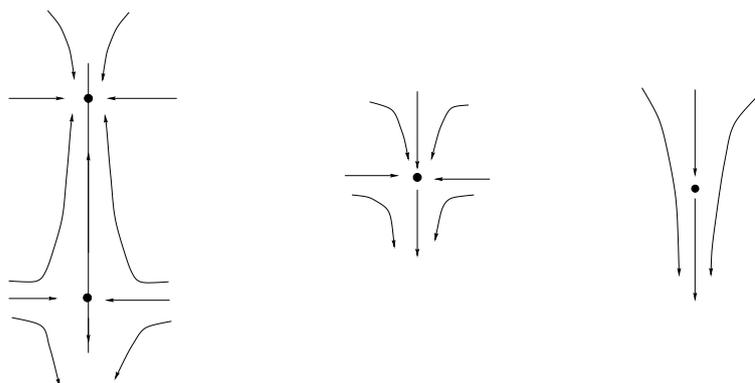


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung einer Sattel-Knoten-Verzweigung

Betrachtungen dienen.

Es sei $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein parametrisiertes Vektorfeld mit folgenden Eigenschaften

$$\begin{aligned} f(0, 0) &= 0 \\ \ker D_x f(0, 0) &\neq \{0\} \\ R(D_x f(0, 0)) \oplus D_\lambda f(0, 0)1 &= \mathbb{R}^n \\ \langle D_{xx} f x_0, x_0 \rangle &\notin R(D_x f(0, 0)), \end{aligned}$$

wobei x_0 den Kern von $D_x f(0, 0)$ aufspannt. Dann ist $Df(0, 0)$ surjektiv, also $f^{-1}(0)$ eine eindimensionale glatte Mannigfaltigkeit. Sei $(x(s), \lambda(s))$ eine lokale Parametrisierung. Dann ist $f(x(s), \lambda(s)) = 0$ und natürlich auch $\frac{d^j}{ds^j} f(x(s), \lambda(s)) = 0$. Für $j = 1$ ergibt sich

$$D_x f(0, 0)\dot{x} + D_\lambda f(0, 0)\dot{\lambda} = 0.$$

Da $D_\lambda f(0, 0)\dot{\lambda} \in \ker D_x f(0, 0)$, ist $D_x f(0, 0)x \neq 0$, also $\dot{\lambda} = 0$ und $\dot{x} = \alpha x_0$. Für $j = 2$ ergibt sich

$$f_{xx}\dot{x}^2 + f_x\ddot{x} + D_{\lambda x} f \dot{x}\dot{\lambda} + f_\lambda \ddot{\lambda} = 0.$$

Es folgt aus den Annahmen $\ddot{\lambda} \neq 0$. Insbesondere haben wir die wesentlichen Eigenschaften einer Sattel-Knoten Verzweigung.

Transkritische und Pitchfork-Verzweigungen

Führt die Verzweigungsgleichung von Lyapunov-Schmidt auf eine Gleichung der Form

$$(6.5.1) \quad \lambda x \pm x^2 = 0,$$

spricht man von einer transkritischen Verzweigung, das Bild entspricht der Abbildung 6.4. Natürlich ist die Gleichung (6.5.1) nur ein Beispiel einer Gleichung, die auf eine transkritische Verzweigung führt, weitere Beispiele gehen einfach durch Koordinatentransformationen aus (6.5.1) hervor. Solche Koordinatentransformationen sind

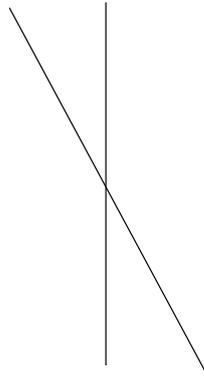


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung einer transkritischen Verzweigung

Grundlage einer *Klassifikation* von Verzweigungsdiagrammen. Jede Klasse von Koordinatentransformationen definiert eine Äquivalenzrelation auf der Menge (von Keimen) von C^∞ -Abbildungen. Sucht man sich einen einfachen Repräsentanten aus jeder Klasse spricht man von Normalformen (bezüglich der gewählten Äquivalenzklasse). Eine tiefere Darstellung der damit verbundenen Theorien und auch die Erfolge bei der Anwendung in außermathematischen Bereichen findet man in dem Werk von GOLUBITSKY & SCHAEFFER bzw. GOLUBITSKY, STEWART & SCHAEFFER [?, ?]. Führt jedoch die Verzweigungsgleichung von Lyapunov-Schmidt auf eine Gleichung der Form

$$(6.5.2) \quad \lambda x + x^3 = 0,$$

spricht man von einer Pitchfork-Verzweigung, das Bild entspricht der Abbildung 6.5. Dies ist das klassische Verzweigungsdiagramm, das wohl der ganzen Theorie den Na-

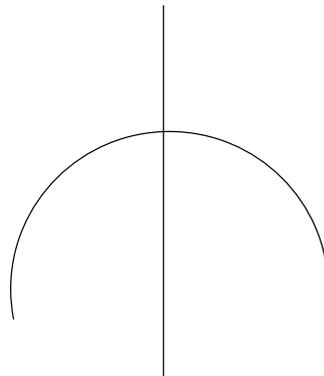


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung einer sogenannten Pitchfork-Verzweigung.

men gegeben hat. Wir wollen nun ohne Beweis noch ein paar Anmerkungen zur Klassifikation machen. Hat man eine gegebene Verzweigungsgleichung und sind alle Verzweigungsgleichungen, die bezüglich einer gegebenen Topologie in der Nähe liegen,

bezüglich der gewählten Äquivalenzrelation äquivalent, so spricht man von **stabilen Verzweigungsdiagrammen**. Gibt es jedoch verschiedene Normalformen in der Nähe, und werden diese durch Variation von n reellen Parametern beschrieben, so sagt man das vorgelegte Problem habe **Kodimension** n . Die Bestimmung der Kodimension und die Berechnung der Normalformen ist ein **algebraisches Problem**, dessen Lösung unmittelbare Konsequenzen für viele Anwendungen hat. Es stellt sich heraus, daß bezüglich wichtiger Äquivalenzrelationen die Pitchfork-Verzweigung die Kodimension 2 hat, die transkritische Verzweigung die Kodimension 1 hat und nur die Sattel-Knoten-Verzweigung stabil ist. Dies rechtfertigt, trotz der historischen Bedeutung, die etwas stiefmütterliche Behandlung der beiden zuerst genannten Verzweigungstypen.

Satz 6.5.3 [Crandall-Rabinowitz, 1971]⁴ *Sei $\dot{u} = f(u, \lambda)$ eine gewöhnliche, parameterabhängige Differentialgleichung mit $f(0, \lambda) = 0$, $A(\lambda) = D_u f(0, \lambda)$ und $A(0)$ habe einen algebraisch einfachen Eigenwert null, τ sei eine Fortsetzung dieses Eigenwertes, d.h. $\tau(0) = 0$ und $\tau(\lambda)$ ist Eigenwert von $A(\lambda)$ (für λ nahe null). Dann enthält jede Umgebung U von $(0, 0) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ nichttriviale Lösungen von $f(u, \lambda) = 0$.*

Beweis. Wir müssen uns überlegen, daß das Reduktionsverfahren von Lyapunov-Schmidt auf eine Gleichung der Form

$$x\lambda + O(|x|) = 0$$

führt (zumindest bis auf Terme höherer Ordnung). Nach dem Satz über implizite Funktionen hat die Gleichung, nach Division durch x , eine Lösung der Form $\lambda = \lambda(x)$. Dann handelt es sich auf jeden Fall um nichttriviale Lösungen. \square

6.5.2 Hopf-Verzweigung

Dies ist neben der Sattel-Knoten Verzweigung der einzige stabile Verzweigungstyp, bezüglich üblicher Äquivalenzbegriffe. Hier fragt man nach dem Entstehen kleiner periodischer Lösungen durch den Übergang von einer stabilen Ruhelage zu einer instabilen Ruhelage. Die Entdeckung dieses Phänomens geht auf den Mathematiker Eberhard Hopf⁵ zurück.

Satz 6.5.4 [E. Hopf, 1943] *Sei $\dot{u} = f(u, \lambda)$ eine gewöhnliche, parameterabhängige Differentialgleichung mit $f(0, \lambda) = 0$. Wie zuvor sei $A(\lambda) = D_u f(0, \lambda)$ die Linearisierung bei 0. Wir setzen voraus, $A = A(0)$ habe einen einfachen Eigenwert $\pm i$, keine Eigenwerte der Form ni , $n \in \mathbb{N}$. Außerdem sei $\tau(\lambda) = \alpha(\lambda) \pm i\beta(\lambda)$ eine Fortsetzung des Eigenwertes i mit $\alpha'(0) \neq 0$. Dann gibt es in jeder Umgebung von $(0, 0)$ geschlossene Orbits der angegebenen Differentialgleichung.*

⁴Michael Crandall, Paul Rabinowitz: in den USA lebende und lehrende Mathematiker. Sie zählen zu den führenden Analytikern der Gegenwart. Paul Rabinowitz beschäftigt sich insbesondere mit topologischen Methoden in der Theorie hamiltonscher Systeme und Variationsrechnung.

⁵Eberhard Hopf (17.4.1902-24.7.1983), Bruder des Topologen Heinz Hopf, wirkte vor allem in der Ergodentheorie und auf dem Gebiet der partiellen Differentialgleichungen. Neben der nach ihm benannten Verzweigung trägt noch ein wichtiges Lemma in der Theorie der Maximumprinzipien seinen Namen.

Beweis. Den vollständigen Beweis wollen wir nur im \mathbb{R}^2 führen, einige Überlegungen gelten aber immer, dies wollen wir in voller Allgemeinheit angeben. Allerdings ist in unserem Beweis die Hauptidee „zweidimensional“. Ein Beweis des Satzes in voller Allgemeinheit bedarf entweder etwas (nichtlinearer) Funktionalanalysis oder eines wichtigen Satz aus der Theorie der gewöhnlichen Differentialgleichungen, dem sogenannten Zentrumsmannigfaltigkeitssatz, der Anfang der sechziger Jahre vom amerikanischen Mathematiker A. Kelley bewiesen worden war. Zunächst beachten wir, daß es eine Umgebung W von $(0, 0)$ gibt, die keine nichttrivialen Ruhelagen enthält. Dies folgt aus dem Satz über implizite Funktionen, da null nicht Eigenwert von A ist.

Im zweidimensionalen Raum ist der Beweis erbracht, wenn wir zeigen, daß jede Umgebung vollständige Trajektorien beinhaltet. Denn dann folgt die Behauptung aus dem Satz von Poincaré-Bendixson.

Wir halten den Parameterwert $\lambda = 0$ fest und zeigen, daß hinreichend nahe bei *null* zu einer Transversale die Poincaré-Abbildung definiert ist. Wir betrachten die Differentialgleichung in Polarkoordinaten, der lineare Anteil hat die Form

$$\begin{aligned}\dot{r} &= 0 \\ \dot{\varphi} &= 1.\end{aligned}$$

Die nichtlinearen Terme führen auf eine allgemeine Form

$$\begin{aligned}\dot{r} &= o(r^2) \\ \dot{\varphi} &= 1 + o(r).\end{aligned}$$

Als Transversale wählen wir die x -Achse. Als Anfangswert wählen wir den Punkt mit dem Abstand $0 < r_0 < \frac{\delta}{2}$. Ist δ hinreichend klein, so gibt es eine Zeit $t_1 > 0$ mit $r(t, r_0) < \delta$ für $0 \leq t \leq t_1$ und $\varphi(t_1, 0) = 2\pi$. Solange $r < \delta$ ist $\dot{\varphi} \geq 1 - \delta$ und $\varphi(t) = t(1 - \delta)$. Es gibt Zahlen a, b mit $\dot{r} < ar^2, \dot{\varphi} > 1 - b\delta$. Wähle $\delta > 0$ mit

$$\delta < \min \left\{ \frac{1}{10b}, \frac{5b}{a} \right\}.$$

Nun ist $\varphi(t) \geq (1 - b\delta)t$. Also existiert ein $t_1 < \frac{2\pi}{1-b\delta}$, so daß $\varphi(t_1) = 2\pi$. Solange $t < \frac{1}{2a\delta}$ ist, bleibt $r(t, r_0) \leq \delta$. Mit der angegebenen Wahl von δ werden beide Wahlmöglichkeiten erfüllt.

Sei $r_1 = r(t_1, r_0)$. O.B.d.A. ist $r_1 < r_0$. Das Gebiet, das von dem Intervall $[r_1, r_0]$ und vom Bogen $\{r(t, r_0) \mid 0 \leq t \leq t_1\}$ umschlossen wird, ist positiv invariant, siehe Abbildung 6.6 (und vergleiche den Beweis des Satzes von Poincaré-Abbildung).

Dann ist für $\lambda > 0$ auch $r(t(\lambda), r_0) = 0$ für ein $t(\lambda)$ nahe t_1 . Wegen der stetigen Abhängigkeit von Parametern ist für $|\lambda|$ ausreichend klein auch noch $r(t(\lambda), r_0) < r_0$. Nun ist der oben angegebene Bereich auch für $\lambda > 0$ positiv invariant und enthält daher die Grenzmengen aller Anfangswerte. Da für $\lambda > 0$ der Ursprung abstoßend ist, kann keine ω -Grenzmenge den Ursprung beinhalten. Weil das angegebene Gebiet relativ kompakt ist, sind Grenzmengen nicht leer. Der Satz von Poincaré-Bendixson garantiert nun eine Ruhelage oder einen geschlossenen Orbit in der Grenzmenge. Wir

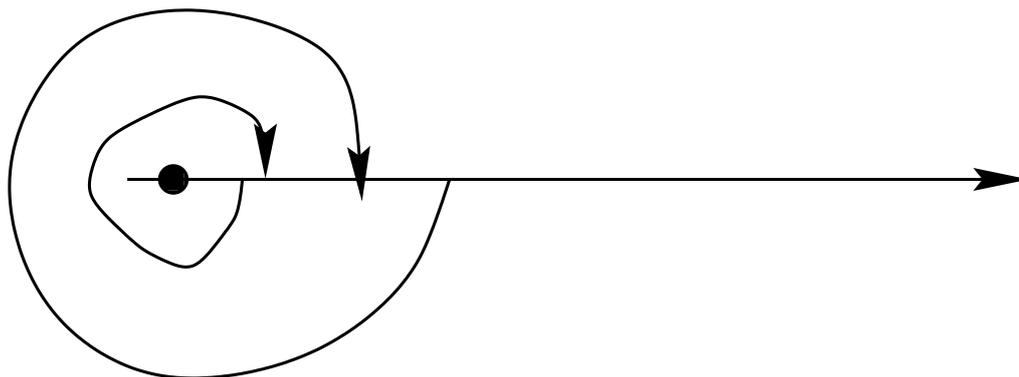


Abbildung 6.6: Illustration des Beweises für den Hopfschen Verzweigungssatz in zwei Dimensionen.

hatten am Anfang gesehen, daß es eine Umgebung gibt, in der sich keine nichttrivialen Ruhelagen befinden. Daher muß in der ω -Grenzmenge auf jeden Fall ein geschlossener Orbit auftreten. \square

Bemerkung 6.5.5 Für einen vollständigen Beweis gibt es mindestens zwei Varianten: Man reduziert entweder auf eine zweidimensionale gewöhnliche Differentialgleichung und benutzt die obige Idee. Man kann sogar zeigen, daß die Voraussetzungen implizieren, daß die Gleichung $r(t, r_0) = r_0$ maximal eine Lösung haben kann. Damit hätte man sogar die Eindeutigkeit des Lösungszweiges gezeigt.

Die zweite Variante besteht darin, die Gleichung so umzuschreiben, daß die Methode von Lyapunov-Schmidt anwendbar wird. Man macht dies, indem man sich auf einen Raum von 2π -periodischen Funktionen beschränkt und dort die Nullstellenmenge des Operators $G(u, \lambda) = \omega \dot{u} - f(u, \lambda)$ untersucht. Man beachte, daß die Linearisierung dieses Operators einen *doppelten* Eigenwert null besitzt. Allerdings tritt hier noch die à-priori unbekannte Periode der periodischen Lösungen auf. Durch einen Kunstgriff reduziert sich das Problem auf eine Verzweigungsgleichung, die der Situation am einfachen Eigenwert Null entspricht. Man hat zwei Parameter und sucht eine eindimensionale Schar von Lösungen (nämlich alle auf dem geschlossenen Orbit). Durch Festlegen der Phase, d.h. des Anfangswertes auf dem geschlossenen Orbit, läßt sich die Gleichung für die Periode lösen und der Rest entspricht dem Verhalten am einfachen Eigenwert null.

Bemerkung 6.5.6 Globale Fragen: Die bisher angegebenen Sätze geben *lokale* Verzweigungsbedingungen und Verzweigungsergebnisse. Es gibt eine wichtige Klasse *globaler* Aussagen. Die erste davon geht auf RABINOWITZ [?] zurück. Zusammenhangskomponenten abzweigender Lösungen verbinden entweder zwei Verzweigungspunkte oder sind unbeschränkt (entweder im Parameter oder im Zustand). Ein entsprechendes Resultat im Falle der Hopf-Verzweigung stammt von ALEXANDER & YORKE[?]. Im Fall der Hopf-Verzweigung treten wegen der Periode weitere Probleme auf. Wir wollen diese hier nicht weiter diskutieren.

6.5.3 Stabilitätsverlust für periodischen Lösungen

Das Verhalten von periodischen Lösungen in parametrisierten Familien gewöhnlicher Differentialgleichungen ist wesentlich komplizierter als das von Ruhelagen. Zum Beispiel kann die minimale Periode für $\lambda \rightarrow \lambda^*$ gegen Unendlich streben. Dann findet man jenseits des Wertes λ^* i.A. keine periodische Lösung mehr. Wir wollen nun beschreiben in welcher Weise eine Familie periodischer Lösungen die Stabilität verlieren kann. Es sei $\dot{u} = f(u, \lambda)$ eine parametrisierte Familie von Differentialgleichungen und

$$\{(u(\lambda), \lambda) \mid \lambda \in I\}$$

sei eine glatte Kurve in $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ von Anfangswerten periodischer Lösungen der minimalen Periode $\tau(\lambda)$. Wir setzen voraus, daß die Abbildung $\lambda \mapsto \tau(\lambda)$ stetig ist. (Achtung, dies ist eine Voraussetzung, es folgt nicht aus den anderen, bisher gemachten Annahmen!) Wir nehmen an, für $\lambda < \lambda^* = 0$ seien die Orbits asymptotisch stabil mit (dem trivialen charakteristischen Multiplikator 1) und $(n - 1)$ charakteristischen Multiplikatoren $|\mu_i(\lambda)| < 1$. Für $\lambda = 0$ gebe es neben dem trivialen (mindestens) einen charakteristischen Multiplikator mit Betrag 1. Für $\lambda > 0$ sei mindestens ein charakteristischer Multiplikator dem Betrage nach größer als 1. Dabei gibt es folgende Möglichkeiten:

1. Der betragsmäßig größte (nichttriviale) charakteristische Multiplikator bei $\lambda = 0$ ist ein einfacher Multiplikator mit dem Wert 1.
2. Der betragsmäßig größte (nichttriviale) charakteristische Multiplikator bei $\lambda = 0$ ist ein einfacher Multiplikator mit dem Wert -1 .
3. Es gibt ein Paar betragsmäßig größter (nichttrivialer) charakteristischer Multiplikatoren $\mu, \bar{\mu}$. Dieser letzte Fall sollte noch feiner unterschieden werden, je nachdem ob für den charakteristischen Multiplikator in der Schreibweise $\mu = e^{2\pi i \alpha}$ ein rationales oder irrationales α auftritt. Im rationalen Fall sollte man noch $\alpha = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}$ von den anderen Fällen unterscheiden. Wir werden dies jedoch nicht in aller Feinheit beschreiben.

Wir beginnen mit einigen allgemeinen Bemerkungen. Das Verhalten von periodischen Lösungen untersucht man mittels der Poincaré-Abbildung Π .

Die gegebene periodische Lösung ist Fixpunkt von Π und natürlich auch aller Iterierten. Die Linearisierungen $D_u \Pi^n$ der Iterierten Π^n haben Eigenwerte, welche den (nicht-trivialen) charakteristischen Multiplikatoren der geschlossenen Orbits \mathcal{O} entsprechen, bei Iterierten $n > 1$ allerdings betrachten wir die Multiplikatoren für periodische Lösungen, die mehrfach durchlaufen werden. Dadurch ergeben sich Potenzen μ^n der charakteristischen Multiplikatoren. Dadurch erhält man bei einem einfachen charakteristischen Multiplikator -1 für die zweite Iterierte 1 als einfachen Eigenwert. Bei einem charakteristischen Multiplikator $\zeta \neq \pm 1$ mit $\zeta^m = 1$ erhält man für $D_u \Pi^m$ einen doppelten Eigenwert 1.

Im ersten Fall übertragen sich die Ergebnisse der Verzweigung am einfachen Eigenwert null, durch folgende Konstruktion:

$$g(u, \lambda) = \Pi(u, \lambda) - u.$$

Die Abbildung g hat bei $\lambda_0 = 0$ einen einfachen Eigenwert null. Die einzig stabile Verzweigung ist die Sattel-Knotenverzweigung.

Im zweiten Fall hat $D_u\Pi - \mathbb{1}$ keinen Eigenwert null, es verzweigen keine Fixpunkte von Π . Allerdings hat $D_u\Pi^2 - \mathbb{1}$ einen einfachen Eigenwert null. Es verzweigen Lösungen mit (approximativ) der doppelten Periode.

Der Fall konjugiert komplexer charakteristischer Multiplikatoren vom Betrag 1 ist viel komplizierter. Wir wollen nicht näher darauf eingehen. Für eine vollständige Darstellung benötigt man die angegebene feinere Unterscheidung.

6.6 Aufgaben

Aufgabe 6.6.1 Es sei $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ eine Matrix, deren Eigenwerte alle nicht positiven Realteil besitzen. Man betrachte die homogene, lineare Gleichung $\dot{u} = Au$ und zeige, dass die Ruhelage $u = 0$ genau dann stabil ist, wenn alle Eigenwerte auf der imaginären Achse gleiche algebraische und geometrische Vielfachheit besitzen.

Aufgabe 6.6.2 Man beweise, dass eine Ruhelage w_0 einer autonomen Gleichung instabil ist, wenn es eine nichtkonstante Lösung $u(t, u_0)$ gibt mit $w_0 \in \alpha(u_0)$. Ist w_0 instabil, so gibt es entweder ein u_0 mit $w_0 \in \alpha(u_0)$ oder jede Umgebung U von u_0 enthält eine vollständige Trajektorie.

Aufgabe 6.6.3 Man zeige, dass im Korollar 6.2.14 die Matrix B reell gewählt werden kann, wenn A eine reelle Matrix ist. In diesem Fall muß man zulassen, dass P die doppelte Periode wie A hat.

Kapitel 7

Topologische Äquivalenz

7.1 Strukturelle Stabilität

Wir betrachten in diesem Abschnitt C^1 -Vektorfelder auf kompakten Mannigfaltigkeiten, oder aber Lipschitz-stetige Vektorfelder auf einem Gebiet im \mathbb{R}^n mit der zusätzlichen Voraussetzung, daß alle Lösungen auf ganz \mathbb{R} existieren. Es seien v_1, v_2 zwei C^1 -Vektorfelder auf M_1 bzw. M_2 .

Definition 7.1.1 Wir nennen die Flüsse Φ_1 und Φ_2 zu v_1 bzw. v_2 **Orbit-äquivalent**, wenn es einen Homöomorphismus $H : M_1 \rightarrow M_2$ gibt der Trajektorien von v_1 auf Trajektorien von v_2 unter Erhalt der Orientierung der Zeit abbildet. Gilt sogar

$$H(\Phi_1(t, x)) = \Phi_2(t, H(x))$$

so nennen wir v_1 und v_2 **konjugiert** bzw. **topologisch konjugiert**.

Die Anzahl von Ruhelagen und periodischen Lösungen ist eine Invariante unter topologischer Äquivalenz. Ebenso bleiben Stabilitätseigenschaft unter topologischer Äquivalenz erhalten, nicht aber die Eigenwerte der Linearisierung.

Beispiel 7.1.2 1. Der Fluss zu $x \mapsto \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} x$ ist Orbit-äquivalent zum Fluss zu $x \mapsto \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix} x$.

Dies sieht man durch Betrachten geeigneter Transversaler.

2. Aufgrund des Begradigungssatzes 5.1.21 ist in der Nähe jedes regulären Punktes ein Fluss Orbit-äquivalent zum Fluss zum Vektorfeld $(1, 0, \dots, 0)$.

Definition 7.1.3 Ein C^1 -Vektorfeld $v : M \rightarrow TM$ heißt **strukturell stabil**, wenn es eine Umgebung Q von v in der Menge aller C^1 -Vektorfelder $M \rightarrow TM$ gibt, so daß $w \in Q$ impliziert, daß der zu w gehörende Fluss Φ_w topologisch äquivalent zu Φ_v ist. Als Metrik auf dem Raum der C^1 -Vektorfelder wählen wir $d_{C^1}(v, w) = \sup |v(x) - w(x)| + \sup \|Dv - Dw\|$.

Aufgrund der Vorbemerkung treten Verzweigungen nur in nicht strukturell stabilen Vektorfeldern auf. Es ist daher eine allgemeinere Aufgabe, alle strukturell stabilen Vektorfelder zu klassifizieren und darüber hinaus die Umgebungen von nicht strukturell stabilen wiederum in Regionen struktureller Stabilität einzuteilen. Dies ist eine wesentliche Verallgemeinerung der Verzweigungstheorie, wie wir sie im letzten Kapitel gesehen haben.

Beispiel 7.1.4 1. Das Vektorfeld $v : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n : x \mapsto 0$ ist nicht strukturell stabil.

2. Das Vektorfeld

$$v : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 : x \mapsto \begin{pmatrix} -x_2 \\ x_1 \end{pmatrix}$$

ist nicht strukturell stabil.

3. Das Vektorfeld $v : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n : x \mapsto -x$ ist strukturell stabil

Die erste Aussage ist leicht einzusehen. Der Fluss zu $\dot{x} = c \in \mathbb{R}^n$ ist für jedes $c \neq 0$ nicht Orbit-äquivalent zum trivialen Fluss $\Phi(t, \cdot) = \mathbb{1}$.

Im zweiten Fall betrachten wir einfach die Störung

$$v_\varepsilon : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 : x \mapsto \begin{pmatrix} -x_2 + \varepsilon x_1 \\ x_1 + \varepsilon x_2 \end{pmatrix}.$$

Für jedes $\varepsilon \neq 0$ hat das v_ε keine periodische Lösung.

Die dritte Aussage, ist schwerer zu beweisen. Der Satz über implizite Funktionen besagt (man überlege sich eine genaue Begründung), daß jedes C^1 -Vektorfeld v_ε , das bezüglich der Metrik d^{C^1} genügend nahe bei v ist, genau eine asymptotisch stabile Ruhelage u^* hat, und daß für jeden Anfangswert u_0 gilt $\omega(u_0) = u^*$. Setze $H(0) = u^*$. Aufgrund des Umkehrsatzes von Ljapunov gibt es bei u^* eine positiv definite Ljapunov-Funktion V mit $\dot{V} < 0$. Sei $c \neq 0 \in V(U)$, wobei U die Umgebung ist, in der nach Satz über implizite Funktionen keine weitere Ruhelage von v_ε liegt. Setze $T = V^{-1}(c)$. T ist Transversale zum Vektorfeld und homöomorph zu einer Sphäre (Satz über implizite Funktionen). Sei $h : T \rightarrow S^{n-1}$ ein Homöomorphismus, der nach der eben gemachten Aussage existiert. Setze für $x \in S^{n-1}$

$$H(x) = h(x)$$

und für allgemeines $u_0 \in \mathbb{R}^n$, sei $t \in \mathbb{R}$, so daß $u(t, u_0) \in S^{n-1}$. Setze

$$H(u_0) = \Phi_{v_\varepsilon}(h(u(t, u_0)), -t).$$

Zu zeigen ist:

1. H ist eine Bijektion.
2. H ist stetig.

3. H^{-1} ist stetig.

H ist wohl-definiert und injektiv. Da u^* global asymptotisch stabil ist, ist H auch surjektiv. Der einzige Punkt, an dem die Stetigkeit unklar ist, ist $u = 0$. Da aber $u = 0$ global asymptotisch stabil ist, ist auch dort die Stetigkeit gewährleistet.

Eine erste allgemeine Aussage liefert der folgende Satz.

Satz 7.1.5 Sei M eine kompakte Mannigfaltigkeit und $v : M \rightarrow TM$ ein C^1 -Vektorfeld. Ist Φ_v strukturell stabil, so hat v nur endlich viele Ruhelagen und jede dieser Ruhelagen ist hyperbolisch.

Beweis. Wenn wir zeigen, daß jede Ruhelage notwendigerweise hyperbolisch ist, dann folgt auch die Aussage über die Anzahl (auf einer kompakten Mannigfaltigkeit). Angenommen u^* sei eine nicht-hyperbolische Ruhelage. Sei U eine Umgebung und χ eine $C_0^\infty(U, \mathbb{R})$ -Funktion. Wähle einen Eigenwert $\mu \in i\mathbb{R}$ und störe alle anderen Eigenwerte von der imaginären Achse, so daß μ einfacher Eigenwert wird. Nun können wir eine kleine Störung angeben, die zu einer Verzweigung am einfachen Eigenwert Null oder einer Hopf-Verzweigung führt. Dies widerspricht der strukturellen Stabilität. \square

Strukturelle Stabilität impliziert nicht nur Bedingungen an die Gleichgewichtslagen, sondern auch an weitere signifikante Erscheinungen des Flusses. Wir betrachten zunächst ein Beispiel.

Beispiel 7.1.6 Sei $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ ein C^1 -Vektorfeld mit zwei Gleichgewichtslagen und einem verbindenden Orbit. Wir betrachten zunächst den Fall zweier (hyperbolischer) Sättel, o.B.d.A. nehmen wir an, das Vektorfeld habe die Form

$$\begin{aligned} \dot{x} &= xy \\ \dot{y} &= y^2 - 1. \end{aligned}$$

Das Phasenportrait ist schematisch in Abbildung 7.1 dargestellt. Wir wollen zeigen, daß diese Verbindung der strukturellen Stabilität widerspricht. Wir betrachten eine Umgebung des Ursprungs U und eine C_0^∞ -Funktion χ mit $\text{supp } \chi \subset U$. Wir betrachten die Störung $\chi(x, y) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$. Durch diese Störung wird offensichtlich der verbindende Orbit zerstört.

Das nächste Beispiel zeigt den Fall einer Sattel-Knoten-Verbindung.

Beispiel 7.1.7

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -x \\ \dot{y} &= y^2 - 1. \end{aligned}$$

Das Phasenportrait hat schematisch die in Abbildung 7.2 gezeigte Gestalt. Wir wollen zeigen,

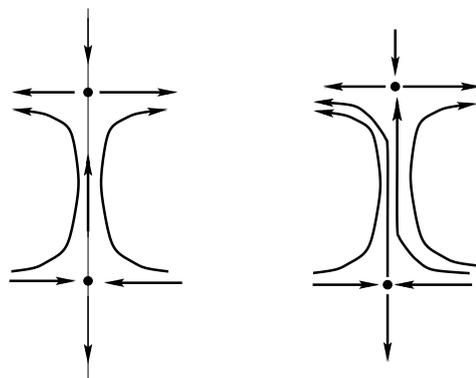


Abbildung 7.1: Das Bild einer Sattel-Sattel Verbindung.

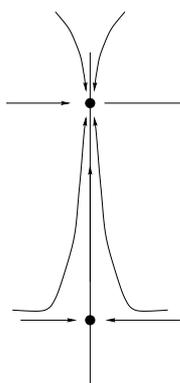


Abbildung 7.2: Das Bild einer Sattel-Knoten Verbindung.

daß dieses System strukturell stabil ist. Wir betrachten eine Umgebung des Q dieses Vektorfelds in der Menge der C^1 -Vektorfelder bezüglich der metrik d^{C^1} . Jedes Vektorfeld in der Nähe hat genau zwei Ruhelagen, einen Sattel und einen Knoten. Da die Menge der Punkte, deren ω -Limesmenge der Punkt $(0, -1)$ ist, offen ist, bleibt eine Verbindung bestehen. Die strukturelle Stabilität des Systems bedarf einiger weiterer Überlegungen. Wir kommen später darauf zurück.

Nun wollen wir die im Beispiel gemachten Erfahrungen verallgemeinern. Wir erinnern zunächst an den Beweis des Satzes 6.1.4: Beim Beweis des Satzes 6.1.4 über Spektrum und Stabilität II haben wir gezeigt, daß zu jedem u_0 im Eigenraum zu Eigenwerten mit positivem Realteil eine Lösung existiert, die rückwärts gegen null konvergiert und deren Eigenwert durch Projektion auf diesen Wert u_0 abgebildet wird. Wir hatten damals bereits erwähnt, daß diese Aussage fast den Satz von der instabilen Mannigfaltigkeit beweist, der aussagt, daß falls w_0 hyperbolische Ruhelage ist, die Menge der Anfangswerte u_0 mit $\alpha(u_0) = w_0$ eine Mannigfaltigkeit bilden.

Definition 7.1.8 Sei w_0 eine hyperbolische Ruhelage. Die **instabile Menge** $W^u(w_0)$ von u_0 ist definiert als die Menge aller u_0 mit $\alpha(u_0) = w_0$. Ebenso definiert man die **stabile Menge** als die Gesamtheit der Punkte, deren ω -Limesmenge w_0 ist.

Satz 7.1.9 $W^u(w_0)$ und $W^s(w_0)$ bilden Mannigfaltigkeiten, deren Dimension sind durch

$$\dim W^u(w_0) = \dim E^+(w_0),$$

bzw.

$$\dim W^s(w_0) = \dim E^-(w_0)$$

gegeben.

Beweis. Lokal, d.h. in der Nähe, d.h. in einer Umgebung V von w_0 ist dies eine Überlegung, die auf dem Beweis von Satz 6.1.4 aufbaut. Zu jedem Punkt auf $W^u(w_0)$ gibt es eine Umgebung U und eine Umgebung $W \subset V$, so daß U diffeomorphes Bild von W ist. Dies beweist dann die Aussage. \square

Natürlich sind Schnittpunkte von $W^u(w_0)$ und $W^s(w_1)$ Punkte auf heteroklinen Orbits, die w_0 mit w_1 verbinden. Offenkundig ist auch die Existenz eines verbindenden Orbits eine Invariante unter topologischer Äquivalenz. Weit weniger offenkundig ist der folgende Sachverhalt: Ist Fluss Φ_v zu v strukturell stabil und schneiden sich $W^u(w_0)$ und $W^s(w_1)$, so ist dieser Schnitt transversal. Dabei heißt ein Schnitt zweier Mannigfaltigkeiten $N_1, N_2 \subset M$ transversal, wenn für $x \in N_1 \cap N_2$ folgt $T_x N_1 + T_x N_2 = T_x M$. Dieser Sachverhalt, den wir hier nicht beweisen können, der aber durch das folgende Bild klarer wird, hat wichtige Konsequenzen: In strukturell stabilen Systemen gibt es weder homokline Lösungen noch heterokline Zykel. Dabei heißt eine Folge von Ruhelagen w_1, \dots, w_m mit verbindenden Orbits \mathcal{O}_i mit $\omega(\mathcal{O}_i) = w_{i+1 \bmod m}$, $\alpha(\mathcal{O}_i) = w_i$ ein heterokliner Zyklus. Warum sind solche speziellen Lösungen in strukturell stabilen Systemen

nicht möglich? Ist $u_0 \in W^u(w_0) \cap W^s(w_1)$, so ist u_0 ein regulärer Punkt und die gesamte Trajektorie ist im Schnitt $W^u(w_0) \cap W^s(w_1)$. Der Rest ist eine einfache Übung der Arithmetik, wir betrachten den Fall eines heteroklinen Zyklus mit zwei Ruhelagen w_0, w_1 und verbindenden Orbits $\mathcal{O}_1 = \{u(t, u_1) | t \in \mathbb{R}\}$, $\mathcal{O}_2 = \{u(t, u_2) | t \in \mathbb{R}\}$. Eine bildliche Vorstellung vermittelt die folgende Skizze 7.3. Angenommen der Schnitt wäre in jedem

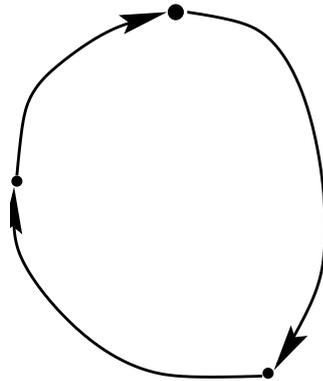


Abbildung 7.3: Ein schematisches Bild eines heteroklinen Zyklus.

Punkt auf den Orbits transversal, sei $n = \dim M$, $n_i = \dim W^u(w_i)$, $m_i = \dim W^s(w_i)$, so gilt

$$\begin{aligned}
 n_1 + m_1 + n_2 + m_2 &= \dim W^u(w_1) + \dim W^s(w_1) + \dim W^u(w_2) + \dim W^s(w_2) \\
 &= 2n \\
 &= \dim T_{u_1} M + \dim T_{u_2} M \\
 &= \dim(T_{u_1} W^u(w_1) + T_{u_1} W^s(w_2)) + \dim(T_{u_2} W^u(w_2) + T_{u_1} W^s(w_1)) \\
 &= \dim T_{u_1} W^u(w_1) + \dim T_{u_1} W^s(w_2) - \dim(T_{u_1} W^u(w_1) \cap T_{u_1} W^s(w_2)) \\
 &\quad + \dim T_{u_2} W^s(w_1) + \dim T_{u_2} W^u(w_2) - \dim(T_{u_2} W^s(w_1) \cap T_{u_2} W^u(w_2)) \\
 &\geq n_1 + m_2 - 1 + n_2 + m_1 - 1 \\
 &> n_1 + m_2 + m_1 + n_2.
 \end{aligned}$$

Für alle weiteren Fälle kann man eine ganz ähnliche Rechnung durchführen. Neben einigen Beispielen für strukturell stabile Flüsse haben wir noch notwendige Bedingungen für strukturelle Stabilität gesehen.

Eine genaue Klassifikation der strukturell stabilen Systeme stammt von ROBINSON[?] aus dem Jahr 1974. Die Formulierung benötigt ein paar Begriffe, die wir bisher nicht eingeführt haben. Eine weiterführende Diskussion findet man in der sehr schönen Monographie von GUCKENHEIMER & HOLMES [?]

7.2 Der Satz von Hartman-Grobman

In diesem Abschnitt wollen wir beweisen, daß es zu jeder hyperbolischen Gleichgewichtslage einer gewöhnlichen Differentialgleichung $\dot{u} = f(u)$ eine Umgebung U gibt, so daß der auf U eingeschränkte Fluss äquivalent zum Fluss des linearisierten Systems ist. Dies ist der Inhalt des folgenden Satzes.

Satz 7.2.1 Sei w_0 hyperbolischer Fixpunkt eines C^1 -Vektorfeldes v und $Q = D_u v(w_0)$. Φ_Q sei der zum linearen Vektorfeld $u \mapsto Qu$ gehörenden Fluss. Dann gibt es eine Umgebung W von w_0 und eine Umgebung U von $0 \in \mathbb{R}^n$, so daß die Flüsse $\Phi_v|_W$ und $\Phi_Q|_U$ Orbit-äquivalent sind.

Beweis. Die Aussage folgt aus einer vergleichbaren Aussage für Abbildungen. Wir formulieren diese zunächst als Satz 7.2.2, dann beweisen wir, daß Satz 7.2.1 aus Satz 7.2.2 folgt und schließlich zeigen wir Satz 7.2.2. \square

Sei A eine $k \times k$ -Matrix, deren Eigenwerte alle im Inneren des Einheitskreises liegen, B eine $(n - k) \times (n - k)$ -Matrix, deren Eigenwerte alle vom Betrag größer als 1 sind. Sei

$$P = \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix}.$$

Sei $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine glatte Abbildung mit $D_u F(0) = 0$. Wir betrachten die Abbildung

$$G : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n : u \mapsto Pu + F(u).$$

Satz 7.2.2 Ist P regulär, so gibt es Umgebungen U, V von $0 \in \mathbb{R}^n$ und einen Diffeomorphismus $\Psi : V \rightarrow U$, so daß für $u \in U$ gilt

$$\Psi \circ G \circ \Psi^{-1}(u) = Pu.$$

Wir führen nun die Aussage des Satzes 7.2.1 auf den Satz 7.2.2 zurück. Wir können annehmen, daß der Fluss Φ_v zu v die Form $\exp(Qt) + r(t, u)$ hat und $r(t, w_0) = \partial_u r(t, u) = 0$ ist. Q hat Blockdiagonalgestalt und damit auch $\exp(Qt)$. Seien A, B die Blöcke von $\exp(Q) = P$ zu den Eigenwerten im Inneren, bzw. im Äußeren des Einheitskreises. Wir betrachten nun die Aufgabe, die Matrix $\exp(Q)$ zur Zeit-1-Abbildung $\Phi(1, u)$ zu konjugieren. Dies ist wegen Satz 7.2.2 auf einer Umgebung von w_0 möglich. Sei also Ψ_0 diese Konjugation, also $\Psi_0 \circ \Phi(1, \cdot) \circ \Psi_0^{-1} = \exp(Q)$. Setze

$$\Psi = \int_0^1 \exp(-Qs) \Psi_0 \Phi(s, \cdot) ds.$$

Dann ist

$$\begin{aligned}
 \exp(Qt)\Psi &= \exp(Qt) \int_0^1 \exp(-Qs)\Psi_0\Phi(s, \cdot)ds \\
 &= \int_0^1 \exp(-Q(s-t))\Psi_0\Phi(s-t, \cdot)\Phi(t, \cdot)ds \\
 &= \int_{-t}^{1-t} \exp(-Qs)\Psi_0\Phi(s, \cdot)ds\Phi(t, \cdot) \\
 &= \left(\int_{-t}^0 \exp(-Qs)\Psi_0\Phi(s, \cdot)ds + \int_0^{1-t} \exp(-Qs)\Psi_0\Phi(s, \cdot)ds \right) \Phi(t, \cdot).
 \end{aligned}$$

Nun schreiben wir

$$\exp(-Qs)\Psi_0\Phi(s, \cdot) = \exp(-Qs)\exp(-Q)\exp(Q)\Psi_0\Phi(s, \cdot).$$

Wegen $\exp(Q) = \Psi_0\Phi(1, \cdot)\Psi_0^{-1}$ ergibt dies

$$\exp(-Qs)\exp(-Q)\Psi_0\Phi(1, \cdot)\Psi_0^{-1}\Psi_0\Phi(s, \cdot) = \exp(-Q(s+1))\Psi_0\Phi(s+1, \cdot).$$

Damit ist

$$\int_{-t}^0 \exp(-Qs)\Psi_0\Phi(s, \cdot)ds = \int_{-t}^0 \exp(-Q(s+1))\Psi_0\Phi(s+1, \cdot)ds = \int_{1-t}^1 \exp(-Qs)\Psi_0\Phi(s, \cdot)ds.$$

Also wird aus der obigen Gleichung

$$\exp(Qt)\Psi = \int_0^1 \exp(-Q(s))\Psi_0\Phi(s, \cdot)\Phi(t, \cdot)ds.$$

Insgesamt ergibt dies die Konjugation

$$\exp(Qt)\Psi = \int_0^1 \exp(-Qs)\Psi_0\Phi(s, \cdot)ds\Phi(t, \cdot) = \Psi\Phi(t, \cdot).$$

Für den Beweis von Satz 7.2.2 benötigen wir noch ein Lemma aus der Linearen Algebra.

Definition 7.2.3 Wir nennen eine lineare Abbildung $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ *m-hyperbolisch*, falls L keine Eigenwerte vom Betrag 1 besitzt. Mit L^s bezeichnen wir den stabilen Anteil von L , also die Einschränkung auf E^s , den verallgemeinerten Eigenraum zu den Eigenwerten im Inneren des Einheitskreises, und mit L^u entsprechend den instabilen Anteil.

Lemma 7.2.4 *Ist L eine reguläre, m -hyperbolische Matrix und $\alpha > 0$. Dann gibt es eine Norm auf \mathbb{R}^n , welche von einem Skalarprodukt induziert wird (Hilbert-Norm) mit*

$$|\sigma(L^s)| < \alpha, \quad |\sigma((L^u)^{-1})| < \alpha$$

und $E^s \perp E^u$. Weiterhin gilt

$$\max \{ \|L^s\|, \|(L^u)^{-1}\| \} < \alpha.$$

Beweis. Bekannt aus der Linearen Algebra. □

Beweis von Satz 7.2.2. Zunächst wählen wir die Norm, die wir im vorigen Lemma konstruiert haben. Der Übergang zu einer äquivalenten Norm bedeutet, daß wir Lipschitz-Konstanten mit positiven Zahlen multiplizieren und daher sagt uns die Voraussetzung des Satzes, daß wir eine hinreichend kleine Umgebung wählen können, so daß gilt

$$\|g(x) - g(y)\| \leq \lambda \|x - y\|$$

mit

$$2\lambda < \min \{ 1 - \alpha, \|L^{-1}\|^{-1} \}.$$

Schritt 1: $L + g$ ist ein Homöomorphismus.

Lösen wir die Gleichung $Lx + g(x) = y$, so ist diese äquivalent zu

$$x = L^{-1}(y - g(x)) =: f_y(x).$$

Für ein Paar x_1, x_2 rechnet man leicht nach

$$\|f_y(x_1) - f_y(x_2)\| \leq \|L^{-1}\| \|g(x_1) - g(x_2)\| \leq \lambda \|L^{-1}\| \|x_1 - x_2\| < \frac{1}{2} \|x_1 - x_2\|.$$

Damit existiert ein Fixpunkt $x(y)$. Eine einfache Rechnung ergibt die Abschätzung

$$\begin{aligned} \|x(y) - x(\tilde{y})\| &= \|f_y(x(y)) - f_{\tilde{y}}(x(\tilde{y}))\| \\ &\leq \|f_y(x(y)) - f_y(x(\tilde{y}))\| + \|f_y(x(\tilde{y})) - f_{\tilde{y}}(x(\tilde{y}))\| \\ &\leq \frac{1}{2} \|x(y) - x(\tilde{y})\| + \|L^{-1}\| \|y - \tilde{y}\|. \end{aligned}$$

Also folgt

$$\|x(y) - x(\tilde{y})\| \leq 2\|L^{-1}\| \|y - \tilde{y}\|.$$

Also ist $y \mapsto x(y) = (L + g)^{-1}(y)$ gleichmäßig Lipschitz-stetig.

Schritt 2: Sei h wie g . Wir nehmen an, daß es eine eindeutige Abbildung $H(g, h)$ gibt mit $H - \mathbb{1}$ ist stetig und beschränkt, und H ist stetig mit

$$(L + g)H = H(L + h).$$

Setze $A = H(g, 0)$, $B = H(0, g)$. Dann ist

$$L \circ B = B \circ (L + g)$$

und

$$(L + g) \circ A = A \circ L.$$

Insgesamt also

$$(L + g) \circ A \circ B = A \circ L \circ B = A \circ B(L + g).$$

Setzen wir an $A = \mathbb{1} + u$, $B = \mathbb{1} + v$ und $A \circ B = \mathbb{1} + w$ mit $w = v + u \circ B$, so ergibt sich

$$A \circ B = H(g, g) = \mathbb{1}$$

und ebenso $B \circ A = \mathbb{1}$. Also ist H ein Homöomorphismus.

Schritt 3: Mit dem Ansatz $H = \mathbb{1} + u$ bleibt zu zeigen, daß es genau ein stetiges, beschränktes u gibt mit

$$(L + g) \circ (\mathbb{1} + u) = (\mathbb{1} + u) \circ (L + h).$$

Der erste Schritt hat gezeigt, daß ein $L + h$ ein Homöomorphismus ist. Also ist die vorige Gleichung äquivalent zu

$$\begin{aligned} \mathbb{1} + u &= (L + g) \circ (\mathbb{1} + u) \circ (L + h)^{-1} \\ &= L\mathbb{1} \circ (L + h)^{-1} + Lu \circ (L + h)^{-1} + g \circ (\mathbb{1} + u)(L + h)^{-1}. \end{aligned}$$

Da $\mathbb{1} = (L + h) \circ (L + h)^{-1}$ wird diese Gleichung zu

$$u = Lu \circ (L + h)^{-1} + g \circ (\mathbb{1} + h)^{-1} - h \circ (L + h)^{-1}.$$

Wir schreiben dies als

$$u = Lu \circ (L + h)^{-1} + G(u) = K(u).$$

K bildet den Banachraum der stetigen, beschränkten Abbildungen $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ in sich ab. Wir wollen zeigen, daß K einen Fixpunkt hat. Mit den Eigenprojektoren P^s bzw. P^u splitten wir diese Gleichung in ein Paar

$$\begin{aligned} P^s u &= L^s P^s u \circ (L + h)^{-1} + P^s G(u) = K^s(u) \\ P^u u &= L^u P^u u \circ (L + h)^{-1} + P^u G(u). \end{aligned}$$

Wir multiplizieren die letzte Gleichung mit $(L^u)^{-1}$ von links und mit $L + h$ von rechts und erhalten nach Umstellen

$$P^u u = (L^u)^{-1} P^u u \circ (L + h) - (L^u)^{-1} P^u G(u) \circ (L + h) = K^u(u).$$

Die Gleichung $u = K(u)$ ist nun äquivalent zu $u = K^s(u) + K^u(u)$. Wir schätzen nun K^s , bzw. K^u getrennt ab, um mit dem Banach'schen Fixpunktsatz einen Fixpunkt $u = K(u)$ zeigen zu können.

Im folgenden benutzen wir die Äquivalenz der Normen $\|u - v\|_\infty$ und $\max\{\sup |P^s(u - v)(x)|, \sup |P^u(u - v)(x)|\}$. Genauer gilt

$$|v(x)| \leq \|P^s(v(x))\| + \|P^u(v(x))\| \leq 2\|v\|_\infty.$$

Nun haben wir für u, v stetig und beschränkt und $y = (L + h)^{-1}(x)$ bzw. $z = (L + h)(x)$

$$\begin{aligned} \|K^s(u)(x) - K^s(v)(x)\| &\leq \alpha \|P^s u(x) - P^s v(x)\| + \|g(y + u(y)) - g(y + v(y))\| \\ &\leq \alpha \|u - v\|_\infty + 2\lambda \|u - v\|_\infty \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \|K^u(u)(x) - K^u(v)(x)\| &\leq \alpha \|P^u u(x) - P^u v(x)\| + \|g(y + u(y)) - g(y + v(y))\| \\ &\leq \alpha \|u - v\|_\infty + 2\lambda \|u - v\|_\infty. \end{aligned}$$

Insgesamt ergibt sich also

$$\|K^s(u) - K^s(v)\| \leq (\alpha + 2\lambda) \|u - v\|_\infty$$

und

$$\|K^u(u) - K^u(v)\| \leq (\alpha + 2\lambda) \|u - v\|_\infty.$$

Für K erhält man die Abschätzung

$$\|K(u) - K(v)\|_\infty \leq (\alpha + 2\lambda) \|u - v\|_\infty.$$

Da $\alpha + 2\lambda < 1$ ist, gibt es einen eindeutigen Fixpunkt. Dies vervollständigt dann den Beweis. \square

7.3 Aufgaben

Aufgabe 7.3.1 Beweisen oder widerlegen Sie, dass das Vektorfeld $\dot{z} = \bar{z}^2$ auf \mathbb{C} (fassen Sie dies als Kurzschreibweise für ein Vektorfeld auf \mathbb{R}^2 auf) strukturell stabil ist.

Kapitel 8

Euler-Charakteristik

In diesem kurzen Kapitel wollen wir nur zweidimensionale Räume und Mannigfaltigkeiten betrachten. Eine Verallgemeinerung auf höher dimensionale Situationen ist möglich, jedoch muss man dann den Index anders definieren als wir es hier tun.

8.1 Die Drehung eines Vektorfeldes

Wir beginnen mit Überlegungen im \mathbb{R}^2 weisen aber gleich darauf hin, dass es Verallgemeinerungen auf 2-Mannigfaltigkeiten gibt, die mittels Karten auch einfach durchzuführen sind und die wir stillschweigend als gegeben ansehen werden und Verallgemeinerungen auf höher dimensionale Räume gibt, die aber wesentliche neue Ideen benötigen und auf die wir auch nicht eingehen wollen.

Definition 8.1.1 Gegeben sei ein Vektorfeld in einer Umgebung von $0 \in \mathbb{R}^2$. Es sei C ein geschlossener Jordan Bogen. Ferner sei $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$ eine (bis auf die Endpunkte) injektive Parametrisierung des Bogens, so dass v keine Ruhelage auf C habe. Dann ist die Abbildung

$$r : t \mapsto \frac{1}{\|v(\gamma(t))\|} v(\gamma)$$

eine Abbildung $[0, 1] \rightarrow S^1$ mit $r(0) = r(1)$. Es sei

$n_C(v)$ die Anzahl der Umläufe von r auf dem Einheitskreis in mathematisch positiver Richtung.

Wir nennen $n_C(v)$ die **Drehung des Vektorfeldes** längs C .

Es ist $n_C(v) \in \mathbb{Z}$ und daher folgt sofort die folgende Aussage.

Satz 8.1.2 $n_C(v)$ ist stetig in v und C , d.h. es gibt Konstanten $a, b > 0$, so dass $\|v_1 - v_2\| < a$ impliziert

$$n_C(v_1) = n_C(v_2),$$

und $\|\gamma_1 - \gamma_2\| < b$ impliziert

$$n_{C_1}(v) = n_{C_2}(v).$$

Beweis. Offensichtlich. □

Eine Konsequenz ist die folgende Beobachtung: ist $v(0) \neq 0$, so ist für jede Kurve in hinreichend kleinen Umgebung $n_C(v) = 0$. Man sieht dies indem man die Kurve auf einen Punkt zusammenzieht, und der konstante Vektor dreht sich eben nicht um den Mittelpunkt.

Definition 8.1.3 Ist 0 isolierte Ruhelage des Vektorfeldes v so nennen wir die für hinreichend kleine Kurven definierte Drehung $n_C(v)$ den **Index** von v bei 0, d.h.

$$\text{ind}(v, 0) = n_C(v)$$

mit $C = \partial B_\varepsilon(0)$. Entsprechend definieren wir den Index bzgl. jedes anderen Punktes.

Ist nun v ein Vektorfeld, C ein geschlossener Jordan Bogen, so dass v auf C keine Ruhelage hat, so setzen wir

$$j_C(v) = \sum_{u \in K, v(u)=0} \text{ind}(v, u)$$

und bezeichnen dies als Indexsumme von v bezüglich C . Die Indexsumme ist invariant gegenüber Deformationen der Kurve und Störungen des Vektorfeldes, solange keine Ruhelagen auf C liegen. Nun wollen wir für einige Vektorfelder die Drehungen bestimmen, wir betrachten lineare Vektorfelder im \mathbb{R}^2 der Form $v(x) = Ax$ mit

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Im ersten Fall sieht man leicht, dass das Vektorfeld sich genau einmal in mathematisch positiver Richtung dreht, das gleiche Resultat ergibt sich im dritten Fall. Im zweiten Fall ergibt sich beim Umlauf in mathematisch positiver Richtung genau eine Drehung des Vektors, allerdings in mathematisch negativer Weise. Aufgrund der Invarianz der Dreheigenschaften bei Störungen des Vektorfeldes und der Kurve schließt man leicht, dass bei nichtlinearen Vektorfeldern mit **isolierten** Nullstellen der Index immer durch den Index des linearisierten Feldes gegeben ist. Damit überträgt sich das Konzept auf geradlinige Weise auf kompakte 2-dimensionale Mannigfaltigkeiten.

Satz 8.1.4 Die Summe aller lokalen Indizes eines Vektorfeldes auf einer kompakten 2-dimensionalen Mannigfaltigkeit ist unabhängig vom Vektorfeld.

Beweis. Siehe ein Buch über Differentialtopologie, die Idee eines Beweises findet sich auch bei Arnold [2]. □

Definition 8.1.5 Die im letzten Satz definierte Zahl heißt **Euler Charakteristik** der Mannigfaltigkeit.

Beispiel 8.1.6 Die Euler-Charakteristik der zweidimensionalen Sphäre ist 2, die des zweidimensionalen Torus ist 0. Um die zweite Aussage zu begründen gibt man ein Vektorfeld ohne Ruhelage auf dem Torus an (davon gibt es eine große Auswahl). Für die 2-Sphäre betrachten wir das Nord – Süd-Feld, das jeweils am Nordpol und am Südpol einen kritischen Punkt (einen stabilen und einen instabilen) hat, alle Längengrade sind verbindende Orbits. Die Linearisierungen am Nord- und Südpol sind ± 1 und die lokalen Indizes jeweils 1.

8.2 Eine Anwendung auf die Eulersche Polyederformel

Ein Polyeder im \mathbb{R}^3 ist ein Körper, der von endlich vielen ebenen Flächen (und deren Schnittgeraden und einzelnen Punkten) begrenzt wird. Dabei sei F die Anzahl der Flächenstücke, K die Anzahl der Kanten und P die Anzahl der Eckpunkte. Euler entdeckte die grundlegende Formel für konvexe Polyeder

$$F - K + P = 2.$$

Wir wollen diese nun beweisen.

Satz 8.2.1 Für ein konvexes Polyeder gilt

$$F - K + P = 2.$$

Beweis. Durch Anwendung einer endlichen Anzahl stetiger, stückweise affine linearer Abbildungen läßt sich erreichen, dass das konvexe Polyeder auf ein Polyeder Q mit gleicher Ecken-, Kanten- und Flächenanzahl abgebildet werden, so dass alle Eckpunkte auf einer Kugel mit Radius 1 liegen. Wir betrachten nun die Funktion

$$h : S^2 \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto \text{dist}(x, Q)^2.$$

Diese Funktion hat für jede Ecke ein Minimum, für jede Kante einen kritischen Punkt mit indefiniter Linearisierung und für jeden Flächenmittelpunkt ein Maximum. Es sei $v(x)$ das zugehörige Gradientenfeld. Dann ist der lokale Index aufgrund der oben gemachten Beobachtungen für jedes Maximum und jedes Minimum jeweils 1, für die indefiniten kritischen Punkte -1 . Wie oben gesehen ist die Euler Charakteristik der 2-Sphäre 2 und damit ergibt sich die gesuchte Formel. \square

8.3 Aufgaben

Aufgabe 8.3.1 Man verifiziere die Eulersche Polyederformel für die Platonischen Körper, d.h. für Tetraeder, Oktaeder, Quader, Ikosaeder und Dodekaeder.

Aufgabe 8.3.2 Was ist der Index der Singularität von $\dot{z} = \bar{z}^2$? Begründen Sie Ihre Antwort.

Aufgabe 8.3.3 Was ist die Euler-Charakteristik des zweidimensionalen projektiven Raumes? (D.h. der Mannigfaltigkeit, die man erhält wenn man auf einem Kreis die jeweils gegenüberliegenden Randpunkte identifiziert, d.h. wenn eine Äquivalenzrelation einführt, so dass die Äquivalenzklassen von Nichtrandpunkten jeweils aus dem Punkt selbst bestehen und bei Randpunkten, der Punkt und der gegenüberliegende Punkt in einer Klasse liegen.)

Aufgabe 8.3.4 Was ist die Euler-Charakteristik der Kleinschen Flasche? (D.h. der Mannigfaltigkeit, die man erhält wenn man auf einem Zylinder die jeweils gegenüberliegenden Randpunkte identifiziert, d.h. wenn eine Äquivalenzrelation einführt, so dass die Äquivalenzklassen von Nichtrandpunkten jeweils aus dem Punkt selbst bestehen und bei Randpunkten, der Punkt und der gegenüberliegende Punkt in einer Klasse liegen.)

Literaturverzeichnis

- [1] Herbert Amann: Gewöhnliche Differentialgleichungen. Walter de Gruyter Verlag
- [2] V. I. Arnol'd: Gewöhnliche Differentialgleichungen. Springer Verlag
- [3] P. Blanchard & R. L. Devaney & G. R. Hall: Differential Equations. PWS Publishing Company
- [4] D. W. Jordan & P. Smith: Nonlinear Ordinary Differential Equations. Oxford University Press
- [5] Heuser, H., Gewöhnliche Differentialgleichungen. B. G. Teubner, Stuttgart
- [6] K. Jänich: Vektoranalysis. Springer Verlag
- [7] Bröcker, T., Jänich, K.: Differentialtopologie. Heidelberger Taschenbücher, Springer Verlag
- [8] Chillingworth, D.R.J.: Differential Topology
- [9] Dym, McKean, Trigonometric Series and Integrals
- [10] Deimling, K., Nichtlineare Gleichungen und Abbildungsgrade. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York (1974)