

Michel Felgenhauer

**Wirbel, Flossen und Kamele. Fluidische
Ergänzungen Kohärenter Objekte**

Wissenschaftlicher Aufsatz

BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei www.GRIN.com hochladen
und kostenlos publizieren



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Impressum:

Copyright © 2021 GRIN Verlag
ISBN: 9783346390257

Dieses Buch bei GRIN:

<https://www.grin.com/document/1005949>

Michel Felgenhauer

**Wirbel, Flossen und Kamele. Fluidische Ergänzungen
Kohärenter Objekte**

GRIN - Your knowledge has value

Der GRIN Verlag publiziert seit 1998 wissenschaftliche Arbeiten von Studenten, Hochschullehrern und anderen Akademikern als eBook und gedrucktes Buch. Die Verlagswebsite www.grin.com ist die ideale Plattform zur Veröffentlichung von Hausarbeiten, Abschlussarbeiten, wissenschaftlichen Aufsätzen, Dissertationen und Fachbüchern.

Besuchen Sie uns im Internet:

<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

http://www.twitter.com/grin_com

Wirbel, Flossen und Kamele

Gedanken über fluidische Ergänzungen

Michel Felgenhauer, Berlin.

Teil I. Das zwölfte Kamel

Als der alte Beduine durch die Oase reitet, hört er heftigen Streit aus einer der Hütten. Kurzerhand verlässt er den staubigen Weg und bindet sein Kamel neben den anderen an einen Pflock vor dem Stall der Hütte. Der Beduine steht nun im Eingang; drinnen, ein Greis und seine drei Söhne. Der Streit versiegt, als er die Hütte betritt. Für einen Moment herrscht Ruhe. Offenbar geht es um die kleine Kamelherde des sterbenden Vaters, viel hat er ja nicht zu vererben. Das Problem ist ganz einfach und doch so groß. Der älteste Sohn soll nach des Vaters Tod die Hälfte der Herde erhalten; der Jüngste ein Sechstel und der Mittlere ein Viertel. Die Söhne finden diese alte Art und Sitte zu teilen durchaus gerecht, doch leider ist die Herde sehr klein; elf Tiere hat der alte Bauer zu vererben und lacht seine törichten Söhne aus: „wenn ich erst tot bin, könnt ihr die Kamele ja schlachten und auf dem Basar verhöckern, ha!“ Das bringt die Jungen noch mehr auf. Der Besucher hebt die Hand bittet die Streithähne hinaus vor die Hütte, fort vom Sterbebett und weiter vor den Stall, wo nunmehr zwölf Kamele malmend grasen. Er schiebt sechs Tiere zum ältesten Sohn und dieser freut sich sehr, denn sechs Kamele sind ja nun mal mehr als die Hälfte der ganzen kleinen Herde. Der mittlere Sohn erhebt das Wort, doch als er sieht, dass drei Kamele neben ihm zu stehen kommen, bleibt er still. Der Jüngste bekommt zwei Tiere und ist ebenfalls recht zufrieden. Jeder der drei schlitzohrigen Söhne ist besser bedient, als er befürchtet hatte. Der Jüngste hat zwei, der älteste sechs, der mittlere drei Kamele, das sind zusammen? Elf, da stimmt doch etwas nicht? Feixend gehen sie zum greisen Vater, doch diesem ist ein Lächeln um den Mund gezeichnet; er ist zufrieden zur Ruhe gegangen. Draußen macht der alte Beduine das zwölfte Kamel vom Holz, denn es ist sein eigenes und reitet davon.

Natürlich erkennen wir die Weisheit des in allerlei Lügengeschichten angewendeten orientalischen Ebrechts. Doch nicht nur dort. In Friesland erbt der Älteste den Hof und zahlt seine Brüder aus. Die bleiben oft arm und gehen zur See. Oder werden Soldat. Im Schwäbischen ist es anders. Dort teilt man den Hof. Von Generation zu Generation. Es bleibt dann nach Jahrzehnten und Jahrhunderten nur wenig übrig vom alten Gehöft. Die Söhne und Brüder werden wandernde Handwerker. Sogar die Töchter, sie Schneiderinnen. So kommt die Manufaktur in die schwäbische Welt. Schwaben, Schwäbinnen und Schwabende sind Tüftler und gründen Werkstätten. Lokale Industrie entsteht. Auch nicht übel.

Im Orient ist es offenbar anders und bei näherer Betrachtung auch nicht schlecht. Das ungleich geteilte Erbe besitzt eine ordnende Kraft. Die Anteile und Prioritäten des ungleichen aber deterministischen Teilens sind gerade so verschieden, dass eine Generation genügt, auftretende Ungerechtigkeiten zu tilgen und zu normalisieren. Formal artikuliert die Geschichte vom zwölften Kamel eine systemoffene Problemlösung, die auf einer besonderen katalytischen Wirkung einer zusätzlich auftauchenden Ingredienz ebenso kondensierend im Coctail des Geschehens fußt. Der Vorgang will erst dann zur Gänze funktionieren, wenn im erwartbaren Ensemble von Rand- und Nebenbedingungen des Prozesses ein notwendiges, ergänzendes aber gleichermaßen auch unerwartetes Komplement auftaucht. Das zugleich katalytische, wie auch kondensierende Komplement, welches un- aufgefördert emergiert. Und siehe da: die Rechnung um das Erbe des alten Bauers geht mit dem 12. Kamel auf. Aber auch erst dann. Das katalytische Element nimmt am Prozess Teil, ist Teil des Geschehens und gleichzeitig aber auch nicht, das kondensierende Komplement ist nötig und zugleich unnötig, wie sich am Ende herausstellt genau jetzt, als der Beduine auf dem verbleibenden Kamel, seinem eigenen und damit das auf den Prozess katalytisch-kondensierend wirkende Kamel, davonreitet.

Notwendig sein und nicht notwendig sein zugleich, macht dieses Element des Prozesses zu einem praxiologischen Paradoxon immer dann, wenn man das zwölfte Kamel als Argument eines geschlossenen Systems betrachtet. Dieses Argument ist quasi eine sich im Innern des Geschehens plötzlich entfaltende Selbstreferenz, die den Prozess triggert und determiniert, ja überhaupt erst determinierbar macht, ihn traktiert. Für einen systemimpliziten Betrachter, einer Betrachterin, Betrachtenden also, der, die das sich innerhalb der (System-) Grenze aufhält, zu einer gewissermaßen „lagrang'schen Spekulation“, ist das zwölfte Kamel über die beobachtete Zeit hinweg sichtbar, der Beobachter akzeptiert diesen Lösungsvorgang, der sich vor seinen Augen entfaltet. Für ihn ist der Vorgang mit dem Eintreten eines glücklichen Endes übrigens beendet. Erst der euler'sche Beobachter draußen, sieht den anfangs notleidenden Ablauf des Vorgangs und genießt die Magie des Zustandekommens einer glücklichen Lösung bis zum Ausgang der Geschichte, einer Lösung im Sinne der unerwartet sich selbst referenzierenden Vervollständigung¹. Das hier beobachtete selbstbezügliche System stabilisiert sich auf sich selbst und schließt sich darin kurzzeitig – und nur für eine einzige Umdrehung im Getriebe der Geschichte - von seiner Umwelt ab (Lagrange). Innerhalb der Systemgrenzen laufen jetzt die Geschäfte unmittelbar besser, selbst die Margen der Gewinnahme werden größer – denn drei intakte, ganze Kamele sind einfach mal mehr wert, als ($11/4 = 2.75$) Kamelhack – dies ist unbestreitbar ein Vorteil und auf einer abstrakten Ebene der Grund dafür, dass eine Ausrüstung für das Gelände immer einen Dosenöffner enthält, aber selten eine Dose; nennen wir es eine Methode.

So ganz selbst referenzierend ist der Vorgang aber natürlich nicht. Wie wäre die Geschichte wohl ausgegangen, wenn der weise Beduine nicht neugierig auf den Streit in der Hütte eingegangen wäre oder nicht die

¹Douglas R. Hofstadter: Gödel, Escher, Bach, ein Endloses Geflochtenes Band. München 1991, ISBN 3-423-30017-5 (anschauliche Darstellung der Selbstreferenzialität in Mathematik, Kunst und Musik).

richtigen Mittel zur Verfügung gehabt hätte? Wäre die Geschichte gut ausgegangen, wenn ein Esel statt eines Kamels am Pflock angebunden gewesen wäre. Nein. Das Problem fordert einen ganz speziellen Lösungsweg. Wie heißt es so schön: „Probleme sind per se unlösbar (sonst wären sie ja keine Probleme)“. Erst wenn wir das Problem in eine Aufgabe oder in eine Schar von Aufgaben „verwandeln“, können diese Aufgaben und vielleicht dann auch das Problem, gelöst werden. Die nun hier zu lösende Aufgabe der Verteilung des Kamelherdenerbes fordert also eine bestimmte Qualität der Methode, eine auf das Problem konditionierte Lösung, in diesem Fall ein zusätzliches Kamel. In der Mathematik sind „quadratische Ergänzungen“ ein etabliertes Verfahren zum Umformen von Termen, in denen eine Variable quadratisch vorkommt, so dass ein quadriertes Binom entsteht und die erste oder zweite Binomische Formel angewendet werden kann. Dieses Verfahren kann zum Beispiel zur Lösung von quadratischen Gleichungen oder zur Bestimmung der Scheitelform (und damit auch des Scheitelpunkts, also des Extremwerts) von quadratischen Funktionen verwendet werden (Wikipedia).

Gegeben ist die quadratische Funktion: $y = ax^2 + bx + c$
Klammern wir den Leitkoeffizienten a aus: $y = a(x^2 + bx/a) + c$

Mit dem eingeklammerten Term $(x^2 + bx/a)$ kann man nun ein wenig herumspielen. Wenn $a/b = 2d$ ist, dann hat dieser Term nichts anderes als diese Form: $(x^2 + bx/a) = (x^2 + 2dx) = (x^2 + 2dx + d^2) - d^2$

Das probieren wir mal an unserer Eingangsaufgabe aus:

$$y = a(x^2 + bx/a) + c = a(x^2 + bx/a + (b/2a)^2 - (b/2a)^2) + c$$

Wir bilden das Quadrat: $y = a((x + b/2a)^2 - (b/2a)^2) + c$
... und multiplizieren aus: $y = a(x + b/2a)^2 - ab^2/4a^2 + c$
... also: $y = a(x + b/2a)^2 - b^2/4a + c$

Ziel dabei ist es ja, dass am Ende ein quadriertes Binom entsteht². Für einen Mathematiker ist das sofort logisch, für uns Ingenieure und Designer, von Philosophen und Phänomenologen, zu denen manche sich zählen würden, ganz zu schweigen, reine Magie³; will sagen: bitte suchen Sie jetzt nicht das Kamel.

Systemimplizite Lösungswege besitzen im praktischen Leben eine sympathische Eleganz, verschließen sich aber häufig einer unmittelbaren Wahrnehmbarkeit durch einen äußeren Betrachter. Darum ist es so wichtig, dass der alte Beduine sein eigenes Kamel mit einbringt in den Lösungsweg. Natürlich ist das riskant. Er öffnet den engen systemimpliziten Rahmen des Geschehens für einen kurzen Moment, erweitert ihn um sich selbst, bringt ein, ein ergänzendes Element, löst die Aufgabe und entzieht dem Vorgang (.. den Dosenöffner, hätte ich beinahe geschrieben) den katalytischen Schaum (.. was auch nicht viel besser klingt). Bei den Kamelen „investiert“ der Beduine ein weiteres Kamel, bei unserer quadratischen Gleichung „belasten“ wir die Form um eine neue Variable und lösen die Aufgabe. Ganz gegen, übrigens die uns umgebenden Paradigmen sauberen Programmierens (Proper Code) oder den Regeln und Theorien Shannons, die uns in letzter Konsequenz für einen „schludrigeren“ Umgang mit nicht unmittelbar nötiger Information gelegentlich abstrafen. Die Lösung geht also einen kleinen Umweg und bricht dabei auch das eherne „Evolutionsgesetz des Immer Hinauf“ das wir so gerne in unseren Optimierungsalgorithmen zitieren. Und es wäre nun gute wissenschaftliche Praxis, an dieser Stelle die „universale Methode“ zu präsentieren, die diese kleinen, eleganten vielleicht sogar fiesen Erstaunlichkeiten hervorzaubert. Eine

² Beispiel: $y = x^2 + 2x + 5$
 $y = x^2 + 2x + ? + 5$
wie: $a^2 + 2ab + b^2$

$a^2 = x^2$ und $2ab = 2x$, folgt $b = 1$, einsetzen: $y = x^2 + 2x + 1 - 1 + 5$ also: $y = (x+1)^2 + 4$

³Die Phänomenologie (von altgriechisch phainómenon, deutsch ‚Sichtbares, Erscheinung‘ und lógos ‚Rede‘) ist eine philosoph. Strömung, die den Ursprung der Erkenntnisgewinnung in unmittelbar gegebenen Erscheinungen, den Phänomenen, sehen.

Wissensordnung. Einfacher noch: wir wünschen uns eine lösungs-saubere, dem Gesamtsystem implizite Mechanik, die wir verstehen und praktizieren können, am besten ohne uns weitere Gedanken über das Große und Ganze machen zu müssen. Aber so faltenfrei können wir das Gelände vor uns nicht ausbreiten.

Zunächst wissen wir ja recht wenig. Die Lösung unserer Aufgabe hat möglicherweise auch mit der zeitlichen Ordnung des Geschehens zu tun. Es gibt ein Vorher und ein Nachher. Jeden Handelns und sogar jedes ordnenden Wissens über das Handeln. Wissen und Ordnen, das führt auf Foucault⁴. Er benennt Wissensordnung als einen Raum für das, was zu wissen (und zu kommunizieren) überhaupt möglich ist⁵. Dieser Raum beinhaltet also auch das, was zukünftig einmal gewusst werden wird, jemals gewusst worden ist oder in früherer Zeit noch nicht gewusst wurde. Dann aber auftaucht. Spielfiguren sind hier die Wissenden und die Unwissenden der Vergangenheit, der Gegenwart und die zukünftig Wissenden und Unwissenden. Das beruhigt ungemein. Nun waren wir vor ein paar Seiten (ich schreibe übrigens aus persönlichem Grunde inzwischen etwas großformatiger, auch aber nicht nur meiner zunehmend größer werdenden Motorik wegen) angetreten uns über Wirbelstrukturen zu unterhalten. Und ich nutze diesen Ort in der Rede für eine kleine Intervention.

Als ich diesen Text zum ersten Mal schreibe und dann verwerfe, ist die Welt noch eine andere. Corona ist eine Biermarke, die ich zwar damals nicht kenne, weil ich eigentlich Rheingauer bin und in der bierig preußischen Fremde nur geduldet. Aber sehr rasch war CORONA in aller Munde. Man lernt das ja schnell, wenn Veränderungen so kolossal sind wie in den vergangenen Monaten. Das Auto, das später in dieser Geschichte auftauchen wird, ONKO der Golf, ist inzwischen

⁴ Foucault, Michel (1974): Die Ordnung der Dinge. Eine Archäologie der Humanwissenschaften. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

⁵ Der Poststrukturalist Michel Foucault veranschaulicht in seinem Text Die Ordnung des Diskurses, nach welchen Ordnungsmustern Diskurse entstehen, welche Struktur sie aufweisen und anhand welcher Verknappungs- und Kontrollprozeduren sich ihre Aufrechterhaltung und Weitertragung vollzieht.

<https://soziologieblog.hypotheses.org/4844>

Wirbel, Flossen und Kamele

verschrottet. Er wurde innerhalb weniger Tage zweimal aufgebrochen, zuerst geplündert, dann verwüstet. Ich solle Bagatellen doch Online melden, sagt die Polizistin freundlich. Auf der Fahrt von der Polizeistation nach Hause platzt mir der Wärmetauscher und kochend heiß schäumende Soße schießt aus den Heizungsschlitzen. Meine Beifahrerin zerre ich in letzter Sekunde auf den Bürgersteig. Die Verbrennung ist harmlos, nur die Schuhe sind hin. Technische Zusammenhänge sind mir bis heute schleierhaft. Es könnte ein Kloststein gewesen sein. Einen GOLF3 zu knacken ist übrigens eine Kunst, die nur alte Männer – so etwa meines Jahrgangs - beherrschen. Überhaupt eine komische Zeit. Hätte ich damals maskiert eine Postfiliale betreten, wäre ich nicht bedient, sondern verhaftet worden, pandemisch verhielt sich lediglich Pandora, nicht zu verwechseln mit dem Kleinstaat in den Pyrenäen zwischen Spanien und Frankreich. Zur Orientierung: heute ist Aschermittwoch 2021. Das Sein im Homeoffice beschert mir täglich fast zwei geschenkte Stunden Zeit, die ich dereinst auf lebensgefährlichen Straßen morgens hinein und abends aus dem Wedding zurückradelnd verbrachte. Nicht das Motiv, aber ein guter Anlass „Wirbel, Flossen und Kamele“ noch einmal anzufassen.

Oder besser nicht! Sollte eines fernen Tages dieser Text die Welt dort draußen erreichen, genießen wir vielleicht schon eine politische, ethnologische oder genderkonnotative Zensur für Texte dieser Art, dulden Eingriffe die wir heute noch mit einer lässigen Handbewegung abtun, wie letztens noch das Wort „Schulschließung“. Formulierungen wie Quersumme, Orientierung, Schwarzmarkt oder Seemannschaft sind heute noch erlaubt, liegen aber bereits im großen Zettelkasten der politisch Korrekten. Pandora darf noch bewundert werden und Epimetheus belächelt. Aber ihre Tage sind gezählt, denn die gesamte Antike ist ja ein sexistisches Tollhaus. Weil sie es bereits angehen, Pipi

Langstrumpf⁶ umzudichten, die drei Räuber⁷ zu verbieten und Weddinger Straßen⁸ oder den U-Bahnhof „Onkel Toms Hütte“ umzubenennen, hat jede Mühe um einen schon heute als potentiell gefährlich einzustufenden Text überhaupt kaum noch Sinn.

Sinn und Schuld. Sind nicht alle alten weißen Weddinger Männer Profiteure irgendeiner Ausbeutung? Haben wir nicht Alle das recht verwirkt, flache, inkorrekte Texte zu verfassen? Ja und natürlich und wir warten auf den Tag, da sie feststellen, dass Hans Peters keine Frau war, sondern Hoden besaß⁹, wahrscheinlich jedenfalls. Es ist also in diesen Tagen nicht mehr ganz einfach, Texte zu verfassen, von denen man befürchten muss, nein weiß, dass sie aus dem Ruder laufen können und werden. Um Unnützes zu tun ist die Zeit leider zu kurz. Sollte ich mir nicht lieber im Nachmittagsprogramm Dehnbundhosen anschauen, oder die Shopping-Queen? All diese Gedanken lähmen mein Redigieren eines alten Textes, von dem man weiß, nein, von dem ich weiß, dass es anstößig und unwissenschaftlich zugehen wird? Morgen oder nächstes Jahr. Was wissen schon wir Wissenden und Unwissenden der Vergangenheit, der Gegenwart und die zukünftig Wissenden und Unwissenden über das Draußen und die Zeit. Etliche Orte in dieser Geschichte gibt es nicht mehr, gab es nie oder nur so wenig, wie es die beschriebenen Personen nicht gibt. Dies nur zur Vorwarnung.

⁶ Pippi Langstrumpf (mit vollem Namen *Pippilotta Viktualia Rollgardina Pfefferminz Efraimstochter Langstrumpf*) ist die zentrale Figur einer dreibändigen Kinderbuch-Reihe der schwedischen Schriftstellerin Astrid Lindgren und verschiedener darauf basierender Bearbeitungen (wikipedia). Es wurden einige politisch inkorrekte Passagen „bereinigt“.

⁷ Jean-Thomas „Tomi“ Ungerer (* 28. November 1931 in Straßburg; † 9. Februar 2019 in Cork, Irland^[1]) war ein französischer Grafiker, Schriftsteller und Illustrator von Bilderbüchern für Kinder und Erwachsene. Ungerer verstand sich als Elsässer und überzeugter Europäer, blieb jedoch ein Skeptiker gegenüber der europäischen Bürokratie. In der Geschichte „Die der Räuber“ gibt es einen Räuber, der raucht! Es wurden einige politisch inkorrekte Passagen „bereinigt“.

⁸ Petersallee in Berlin Wedding, vormals benannt nach dem in Tansania als *mkono wa damu* (blutige Hand) bekannten Carl Peters. Die Petersallee wurde umbenannt in Petersallee und ehrt seit 1986 den antifaschistischen Widerstandskämpfer und CDU-Politiker Hans Peters.

⁹ Am 17. 3. 2016 beschließt die Bezirksverordnetenversammlung die Drucksache 2568/IV:

Eine Phänomenologie

Was Kamele mit Strömungsmechanik zu tun haben, ist leider nicht schnell erklärt; vielleicht sollte ich den Prozess von seinem Ende her erzählen. Eine mögliche Geschichte geht etwa so:

„Fische nutzen im Fluid enthaltene Wirbel, um beim Voranschwimmen Antriebskraft zu einzusparen. Der Fisch entnimmt einen Teil der in einer Wirbelstruktur enthaltene Energie, um sie beim Bergaufschwimmen für die eigene Bewegung und damit das Schwimmen gegen die Hauptströmungsrichtung einzusetzen. Bei den Wirbelstrukturen handelt es sich um die als erstes von Karman¹⁰ beschriebenen hufeisenförmigen Wirbelstraßen im Nachlauf einer Störstruktur in der Strömung.“

Dies alleine ist schon erstaunlich und bemerkenswert. Für mich war es jedoch unglaublich zu hören, dass dieser Vorgang, erstens passive Anteile enthält, also in einem gewissen Ausmaß autoadaptiv abläuft und zweitens „ordnende Elemente bei Bedarf“ vom Lebewesen, dem Fisch selbst, in den Prozess eingestreut werden können. Wie eine derartige belastungsadaptive Fluid-zu-Fisch-Wechselwirkung erfolgt, werden wir unten diskutieren, wenn auch nicht klären; hier zunächst das in der belebten Natur beobachtete katalytische Phänomen:

Hufeisenförmige Teilwirbel einer Karman'schen Wirbelstraße bestehen aus zwei entgegengerehenden walzenförmigen Wirbeln, die mit einem - eben hufeisenförmigen - Riegel, dessen Struktur aus einer Oszillation im Nachlauf der Strömung um das (obstakale) Hindernis stammt, verbunden sind. Anders als im Labor, ist das Profil der realen Anströmung jedes der vielen Hindernisse, die der Fisch auf dem Weg zu Quelle passiert und vielleicht energetisch abweiden möchte,

¹⁰Theodore von Kármán (* 11. Mai 1881 in Budapest, Österreich-Ungarn als Kármán Tódor; † 7. Mai 1963 in Aachen) war ein ungarisch-amerikanischer Physiker und Luftfahrttechniker. Er gilt als Pionier der modernen Aerodynamik und der Luftfahrt- und Raketenforschung. (Wikipedia)

graduell verzerrt und wenig oder nicht homogen. Außerdem lauert während des Abwartens auf geeignete Wirbelstrukturen hinter einem Stein im Bach und oberhalb der Wasseroberfläche, Gefahr in Gestalt böser Grizzlybären, zu deren Lieblingsspeise Lachse und Forellen gehören. Besonders jene natürlich, die im Nachlauf eines Felsens auf geeignete Wirbel parkend warten. Es gibt also für den Fisch gute Gründe, sich ein bisschen zu beeilen und hurtig mit der gerade geernteten Wirbelenergie fortanzuschwimmen, auf dem Weg zum Laichplatz an der Quelle des Flusses, des Baches.

Wie gesagt, deformierte Hufeisenwirbel umgeben das Strömungsfeld im Nachlauf eines Felsens im Bach und bewegen sich (in der Regel) ohne weiteren Nutzen am Lebewesen vorbei. Eine vorläufige Phänomenologie vermittelt uns:

Ursache und physikalisches Wechselwirkungsgeschehen der lokomotorischen Propulsion des Fisches sind selbst wieder Wirbelstrukturen; also Wirbel, die das Lebewesen in die Strömung absetzt. Wie nahe liegt es da zu fragen, ob oder warum nicht im Zuge der biologischen Evolution eine Methode entwickelt wurde, die einen in der Strömung vorgefundenen, deformierten Hufeisenwirbel zu einer jetzt nunmehr intakten und ausgesprochen potenten Energiequelle ergänzt? Und tatsächlich: Diese Ergänzungsmethode existiert; und sie funktioniert – natürlich – mit Wirbeln.

Versuchen wir zu imaginieren (wie John Lennon sagen würde, dessen Todesnachricht mich auf einer Leiter stehend irgendwie Anfang Dezember 1980 erreichte, durch ein Transistorradio scherbelnd; ich strich gerade die Decke in meinem 14 Quadratmeter WG-Zimmer in der Seestrasse 100), was passiert.

Irgendwie „weiß“ der Lachs, die Forelle, von einem Wirbel in seiner (ihrer) näheren Umgebung. Halt, nicht irgendwo ist der Wirbel, sondern seitlich des Fisches. Da kommt er schon. Der Walzenwirbel schwimmt jetzt vorbei. Er sieht aus wie eine rotierende Gebetsmühle, nur kleiner. Vorne-backbord, backbord, backbord-achtern. Der Fisch

besitzt ein Seitenströmungsorgan. Und ja, der Fisch benutzt sein Seitenströmungsorgan. Wie die Geschichte später zeigt, war dieses Seitenströmungsorgan nicht unbedingt zu jeder Zeit der Forschung als „gesetzt“ gemeldet, dass kognitive Prozesse nicht den Vorgang lenken. Aber gehen wir der Reihe nach voran. Wie fühlt sich wohl ein Wirbel an? Oder noch besser: wie „hört“ sich wohl eine Strömung an, die einen Wirbel transportiert? Der Leser möge sich an dieser Stelle vorzustellen versuchen, dass eine gleichmäßige Strömung einen gleichmäßigen Ton artikuliert. Bei einer Strömungsschnelle, soll der Ton höher werden, bei einer Verlangsamung niedriger und so weiter. Oder so etwa in dieser Art. Was bei einem Wirbel, der mitschwimmt, wirklich passiert, weiß ich nicht. Auch heute nicht. Eine potential-theoretische Darstellung vor Augen, fahre ich fort. Sollte ein Wirbel in einem gewissen Abstand, aber wandnah an mir vorbeirauschen, wäre das ortsfeste Geschwindigkeitsbild (relativ) leicht zu lesen: Mein Ohr, oder mein Mikrophon befände sich auf der (meiner) Backbordseite; das Micro sei der Euler'sche Spekulant: der Wirbel schwimmt nun vorbei. Vorne-backbord, backbord, backbord- achtern. Der (backbord-seitige) Wirbel sei linksdrehend. Für den kurzen Zeitraum seines Vorbeisausens würde mir in diesem Szenario (BB-Seite des Körpers, Wirbel ist linksdrehend) die Strömung eine „Delle vorspielen“. Nun ist das Strömungssinnesorgan eine Aneinanderreihung ganz vieler und vor allem ganz sensibler Sensorenzellen, die in einer technischen Analogie, tatsächlich am ehesten mit einer Anordnung von Mikro-phonen zu vergleichen sind.

In einem derartigen Modell pflanzt sich die Frequenzdelle zeitlich über die gesamte Messstrecke, dem Strömungssinnesorgan, fort. Wir könnten nun ein zweites Szenario entwerfen, bei dem – wiederum backbordseitig lokalisiert, aber mit rechtsdrehendem Sinn, eine Wirbelstruktur an einer Körperwand vorbeisaust und wir würden nun an Stelle einer Delle eine (Frequenz-) Schnelle „hören“.

Ist es wirklich so einfach? Wir werden sehen, nein hören. Die Strömungssinnesorgane sind bei Fischen hochentwickelte Systeme. Warum sollen sie nicht „sehen“ können? Und wie überhaupt kann das funktionieren?

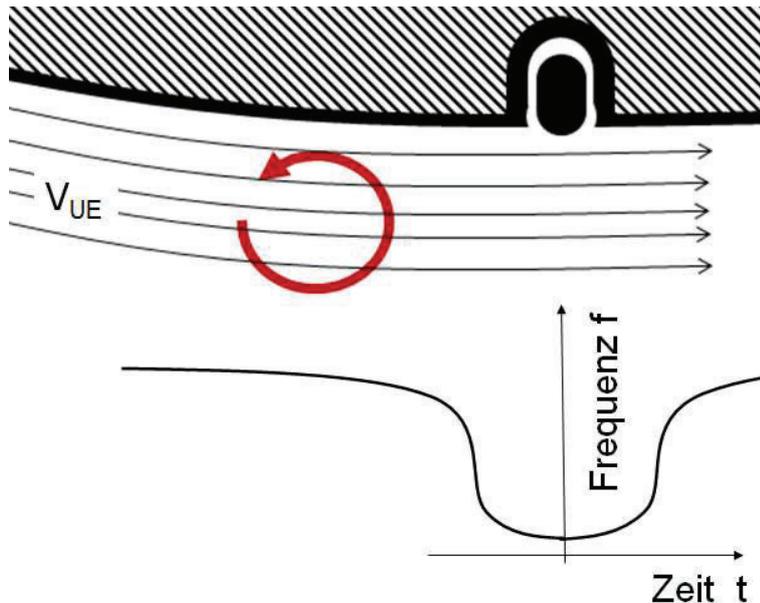


Abb.1: Szenario I: Eine Wirbelstruktur streicht backbordseitig an einem Körper vorbei und wird von einem singulären Detektor als Signal-Delle erkannt.

Das Szenario II ist vielleicht gar nicht so interessant wie Szenario III. In diesem Bild wird von einer ansonsten gleichmäßigen Strömung sowohl backbordseitig als auch steuerbordseitig eine Wirbelstruktur transportiert. Die backbordseitige Struktur sei wieder linksdrehend; die steuerbordseitige Wirbelstruktur aber sei rechtsdrehend. Das Tier – oder in der Analogie der sensible, mikrofonbehaftete Körper - detektiert sowohl links als auch rechts (pardon: backbord- als auch steuerbordseitig) eine Frequenzdelle.

Das superponierte Signal einer „linken und gleichzeitig rechten Delle“ enthält – über das recht einfache Gedankenexperiment hinaus – eine sehr wichtige Information, die möglicherweise vom Lebewesen als Sinnesreiz entgegengenommen wird. Das Signal sagt nämlich: Der Körper, der gerade links und rechts eine Delle hört, befindet sich in einer „intakten Hufeisen-Struktur“. Das bedeutet: die Energie-Ernte kann beginnen.

In einer hohen (leider noch nicht existierenden) Wirbelsemantik bilden zwei walzenförmige „gegeneinander rotierende“ Wirbelstrukturen ein Teilsystem, wie es typisch ist für die natürliche, einer Störung nachlaufenden, Strömung. Die Karman'sche Wirbelstraße ist gerade die Aneinanderreihung derartiger Wirbelteilsysteme. In der Abbildung oben sehen wir eine synthetische Wirbelstraße aus einem Computermodell, eigentlich eine GIF-Datei, wie es für Experimente der künstlichen Musterdetektion verwendet wird. Die dargestellte Karman'sche Wirbelstraße stammt aus einer Computersimulation mit idealisierten Randbedingungen um eine (absolut) symmetrischen Störung in der Strömung; dennoch entsteht ein nichtsymmetrisches Muster aus Wirbelstrukturen. Die Teilsysteme dieses Musters rapportieren periodisch und in einem immer gleichen Schema.

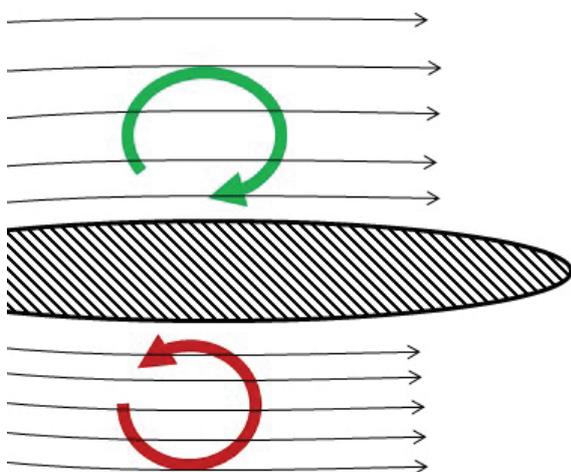


Abb.2: Szenario III.
Möglicherweise wird die Wirbelszenarie von einem Lebewesen als eine linksseitige und eine rechtsseitige Frequenzdelle registriert.



Abb.3: Der Nachlauf einer Störung in der Strömung. Die Karman'sche Wirbelstraße und ein signifikantes Teilelement dieser.

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b4/Vortex-street-animation.gif/220px-Vortex-street-animation.gif>

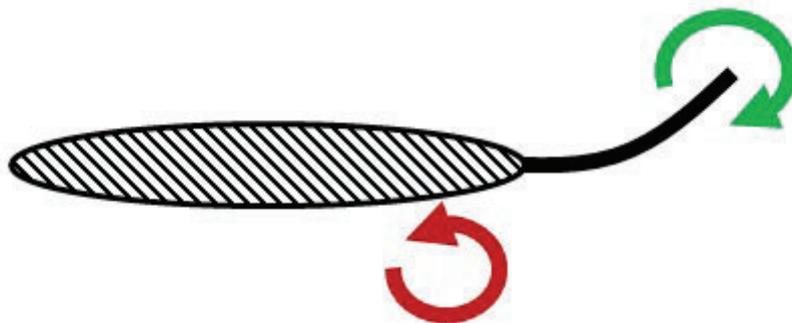


Abb.4: Der die Wirbelstruktur ergänzende Flossenschlag.

Für ein Entwicklungsszenario – und die biologische Evolution ist ein solches mit einem unermesslich großem Versuchslabor, unseren blauen Planeten eben – ist das Auffinden stabiler Qualitätsfunktionen eine notwendige Voraussetzung für einen Entwicklungserfolg oder zumindest einer Kondition des Gestaltungsergebnisses. Und so ein Fisch erscheint uns als eine komplexe, gleichsam aber über Jahrtausenden stabilisierte Biostruktur.

Die (meistens bösen) Betriebs-Wirtschaftswissenschaftler¹¹ würden vielleicht sagen: „Das Viech hält sich schon ziemlich lange am Markt“.

¹¹ Natürlich sind wir nur neidisch. Auf Eure Kohle. Und Innen.

Im Grunde genommen brauchen wir (als etwas tumbe Techniker und vulgäre Betrachter am Rande einer komplizierten Szenerie) dem Lebewesen jetzt nur noch zuzutrauen, dass es die Intaktheit einer Wirbelstruktur von einer Deformation oder Invalidität der Struktur unterscheiden kann. Diese Fähigkeit, die Eleganz einer Formation detektieren zu können, kommt in der belebten Natur tatsächlich vor. Invalidität und/oder Intaktheit als Systemeigenschaft sicher erkennen zu können ist für ein Wesen gegebenenfalls eine Frage von Leben und Tod. Intaktheit, also ein symmetrisch synchrones Reizmuster sollte vom Wesen wahrgenommen werden können; Invalidität im Sinne einer Abwesenheit von vollständiger Intaktheit ebenso.

Ja, wir sprechen von Strömungssinneszellen. Der unvollständigen Wirbelstruktur setzt nun ein gezielter Flossenschlag des Fisches den fehlenden (Teil-) Wirbel bei. Das künstlich reparierte Hufeisengebilde ist in diesem Moment komplett. „Schlagartig funktioniert auch der Aufzug“; der Fisch saust stromaufwärts davon.

Wir haben hier im Hause lange kontrovers die Frage diskutiert, ob es einen passiven Anteil in diesem Wirbelergänzungsvorgang überhaupt gibt und wenn, wie groß dieser wohl sein mag. Die Frage bleibt bislang unbeantwortet. Auch wissen wir bislang noch nicht, welche Rolle das gut ausgeprägte Strömungssinnesorgan der Forelle beim gegebenenfalls kognitiven Gewahrwerden eines Wirbels überhaupt und einer deformierten Wirbelstruktur insbesondere, spielt. Fest steht – und diese Forschung ist nicht unser Verdienst¹² – dass es dem Lebewesen gelingt, einer nichtintakten Wirbelformation, vorgefunden im Nachlauf eines Felsens oder einer anderen Störstruktur im Fluss, ein katalytisches Element beizutragen, indem ein Flossenschlag das natürliche Wirbelsystem zu einem vollständigen Hufeisenwirbel ergänzt. Ob es sich um einen blinden Beduinen handelt, der sein Kamel den anderen beistellt und dann das Erbe aufteilt, oder ob kognitive

¹² Siehe auch: An Efficient Swimming Machine. In Scientific American, March 1995, S 64 ff.

Leistungen Unterstützung den Wirbelergänzungsprozess steuern, ja steuern müssen, bleibt an dieser Stelle offen. Was wir sehen ist, dass es stattfindet und funktioniert.

So, oder wenigstens sehr ähnlich stellt sich das Wissen dar, das wir Ende der 90er Jahre hatten, oder zumindest hätten gehabt haben können. So oder ähnlich, nur viel eleganter und wissenschaftlich korrekt beschreibt Triantafyllou¹³ den Energietransfer aus dem Fluid und in das Wesen an einem wirbelbehafteten Fluss. Was wir hätten wissen können war also ein Gegenstand in einem Raum des existierenden Wissens; nur wussten wir es nicht. Foucault hätte seine Freude gehabt.



Abb. 5a. Tafelbild im April 2017.

¹³ Triantafyllou, M.: Effizienter Flossenantrieb für Schwimmroboter. In: Spektrum der Wissenschaft 08-1995, S. 66–73. Spektrum der Wissenschaft- Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg 1995.

Nichtorthodoxes Belastungs-Bewegungs-Gebaren (NOBB): Fischflossen verhalten sich unter seitlicher Druckeinwirkung in unerwarteter Art und Weise. Drückt man mit dem Finger leicht gegen die Schwanzflosse einer Forelle, so knickt diese nicht in Druckrichtung weg, sondern die Flosse bewegt sich entgegen der Druckrichtung zum Finger hin. Entdeckt wurde das als „Fin Ray Effect®“ benannte Phänomen, vom Berliner Bioniker Leif Kniese. Gemeinsam mit Dr. Rudolf Bannasch entschlüsselte er die Wirkungsweise der Flossenstrahlenstruktur im Labor.

Der Flossenstrahl-Effekt beruht auf der Struktur der einzelnen Flossenstrahlen einer Fischflosse und wurde als technische Konstruktion von der Firma EvoLogics GmbH patentiert (BIOKON)¹⁴. Leif Kniese war in den 90er Jahren Mitarbeiter am Fachgebiet Bionik und Evolutionstechnik der Technischen Universität Berlin. Zu dieser Zeit diskutierten dort Biologen und Ingenieure jene Strömungsphänomene, die mit dem Fin Ray-Effekt im Zusammenhang stehen könnten.

Im April 2017 war es dann soweit... mit unserem Ende. Wir, die berüchtigten unter den unbekanntenen Wissenschaftlern der TU Berlin waren eingeladen, ein letztes Mal die ehrwürdigen Räume unseres Fachgebiets zu besuchen. Es war uns erlaubt, sich genau eine Devotionalie¹⁵ aus den 80ern und dem heute (042017) dann zum Müllgang zusammengeschobenen Laborinventar mit nach Hause zu nehmen.

¹⁴BIOKON ist das Bionik-Kompetenznetz e. V. mit Sitz in Berlin. Unter diesem gemeinsamen Dach arbeiten deutschlandweit Wissenschaftler und forschende Unternehmen eng zusammen, um durch anwendungsorientiertes und interdisziplinäres Umsetzen biologischer Prinzipien in die Technik bionische Innovationen zu beschleunigen, Forschungsk Kooperationen und Wissen zu befördern und die Wettbewerbsfähigkeit der Anwender zu steigern. http://www.biokon.de/bionik/best-practices/detail/page/3/?tx_nenews_uid=1646&cHash=d0e90dcea664cf108b22a1aad5c0f659

¹⁵Devotionalien sind Gegenstände, die der Andacht (lateinisch devotio ‚Hingabe‘, ‚Ehrfurcht‘) und der Förderung der Frömmigkeit (!!)) dienen sollen. (nach Wikipedia)



Abb.5: 2017: Impressionen eines Abschieds. Oben, Abb.5a: Das Tafelbild Wirbelpuleneffekt; seit 1998 wurde die Tafel offenbar nicht mehr gewischt. Unten: Leif setzt sich für uns ein letztes Mal auf einen Stuhl mit „seinem“ Fin Ray Effect®. Die Schautafel erklärt das Phänomen der belastungsadaptiven Verformung (links im Bild).

Natürlich Flossen, will sagen: natürlich flossen Tränen. Neben einem unfassbaren Tafelbild, mein letzter Vortrag an dieser Tafel lag tatsächliche zwanzig Jahre zurück, war Leif, der Meister selbst! so nett, sich ein letztes Mal auf dem Demo-Stuhl mit der Fin Ray-Lehne zu lümmeln.

Tatsächlich war die Vergangenheit nicht immer besser und viele Effekte der belebten Natur blieben unverstanden. Wir Techniker hatten damals in den 90ern schnell eine Hypothese über die passive Energieentkopplung durch Fischflossen parat, doch fehlte uns in dieser Anfangsphase der biologische Hintergrund, um die komplexen strömungsmechanischen Vorgänge zu verstehen. Nicht wenige

prinzipielle Fragen bleiben bis heute ungeklärt, ein misslicher Umstand und Anlass aus Laienhand Informationen zu einer kleinen Übersicht des biologischen Geschehens zusammenzutragen.

Strahlenflosser sind eine sehr erfolgreiche Klasse der Knochenfische, die mit ca. 30.000 bekannten rezenten Arten über 96 Prozent der lebenden Fischarten und damit etwa die Hälfte aller beschriebenen Wirbeltierarten stellen. Obwohl ihre Anatomie und die Mechanik ihres Bewegungsapparates Gegenstand zahlreicher Studien und wissenschaftlichen Untersuchungen ist, wird die Vielfalt von Funktion und Design der namensgebenden Flossenstrahlen, ihr evolutiver Werdegang, das individuelle Wachstum und die Differenzierung während der Individualentwicklung derzeit wenig erforscht. Zuordnungen von Merkmalen und Funktionen der Flossenstrahlen verschiedener Arten mit unterschiedlichen Fähigkeiten und Gewohnheiten, wie Jagen, Flüchten, Wühlen oder verschiedene Schwimmstile sind teilweise noch völlig unbekannt.

Betrachtet man die Fischflosse im Kontext des Fischkörpers, so sind Flossenstrahlen Teil des Wirbeltierskeletts, welches eine Schar fester, gelenkiger (Skelett-) Elemente bildet, die in Zusammenarbeit mit den Muskeln für die Fortbewegung des Wesens wichtig sind. Die sichtbare Membran der Fischflosse wurde im Laufe der Evolution möglicherweise ursprünglich nur von dermalen Schuppen in der sie bedeckenden Haut gestützt. Die Flossen höher entwickelter Knochenfische werden im inneren Bereich durch eine Reihe schlanker Flossenstrahlen stabilisiert. Grundsätzlich sind die Flossenstrahlen der Knorpelfische schlank, nicht gegliedert und elastisch. Sie (die Flossenstrahlen der Knochenfische) sind gegliedert, proximal paarig, distal verzweigt und verknöchert. Auch sie werden evolutions-biologisch von Schuppen abgeleitet beschrieben [W-06] [W-06][Hild-01]. Die Schwanzflosse der Strahlenflosser wird innerhalb ihrer fleischigen Basis von mehreren

Fortsätzen unterstützt und dient den Fischen zur Vortriebskraft-erzeugung, zur Stabilisierung der antriebslosen geradlinigen Fortbewegung und zum Manövrieren.

Fische sind in der Lage, Strömungsphänomene zu adaptieren. Wenn das Tier in seiner fluidischen Umgebung Inhomogenitäten auffindet, also ein Geschwindigkeitsfeld respektive einen geeigneten Druckgradienten, kann es dies zur eigenen Mobilität nutzen, indem es sich im Zickzack von Wirbel zu Wirbel hangelt und für diese Art der Fortbewegung nur relativ geringe Muskelkraft aufwendet. Das Zusammenspiel und das Wechselwirken von in einer Strömung transportierten Wirbeln mit einer Flossenmembran ist ein grundsätzliches Phänomen wirbel- und inversions-behafteter Strömung. Noch haben Biologen dieses Wechselwirkungsgeschehen nicht vollständig geklärt. Strömungsadaption ist Gegenstand der Analyse der aktiven und passiven Wirbelkontrollmechanismen von Wasserlebewesen.

Die Prinzipien der Wirbelkontrolle sind von großer Bedeutung für das Verständnis, wie Fische schwimmen und manövrieren; die Fragen betreffen Arbeitsgebiete der Biologen wie Techniker. Ein harmonisch oszillierender Tragflügel kann in einer mit großen Wirbeln behafteten Strömung vorteilhaft interagieren und Schub erzeugen, wenn sowohl die Wirbelgröße und die Frequenz des harmonisch oszillierenden Profils in der Strömung fitten. Fluid-Struktur-Interaktion von flexiblen Körpern in wirbelbehafteten Strömungen ist Gegenstand dieses Aufsatzes und der rezenten Forschung [Gopa-94][Read-02][Ande-99][Albe-09][Liao-06][Tria-02][Floc-09][Stre-96].

Die Fluid-Struktur-Wechselwirkung beim Impulsaustausch mit dem Fluid über die Membrantragfläche der Fischflosse, kann produktiv oder generativ sein. Bei einer produktiven Wechselwirkung arbeitet die Flossenmembran als Krafttragfläche und koppelt Energie aus der Strömung in die Membran ein. Bei einer generativen Fluid-Struktur-

Interaktion wirkt die Flossenmembran als Arbeitsfläche und koppelt Energie aus der Struktur in das Fluid ein.

In der Technik wird in einer adäquaten Einteilung nach Kraft- und Arbeitsmaschinen unterschieden. Produktion und Generation im Habitat können in einem zeitlich-örtlich ineinander verschränkten, komplexen Gesamtgeschehen stattfinden. Anders als in der Technik, wo der Energie- und Informationsaustausch an Kraft- und Arbeitstragflächen vergleichsweise eindeutig beschrieben und zugeordnet werden kann, stellen sich biologische Tragflügelkonstruktionen als komplexe, zur Rückkopplung und zur Adaption fähige Multifunktionssysteme dar. Diese sind evolutiv optimiert und in der Lage, ihre fluidische Umgebung zu kontrollieren, gestaltend auf sie einzuwirken und sie für ihre Transport- und Mobilitätsbelange zu konditionieren derart, dass das Lebewesen den zeitlichen Ablauf seiner Körperbewegung so ausführt, dass der genezierte Wirbel die in seiner Umgebung vorgefundenen Struktur vorteilhaft ergänzt, wie oben als strömungsmechanische Katalyse erörtert. Dabei haben Periodizität, Frequenz, Phase und Drehrichtung der von in einer Strömung zu einer Flossenmembran transportierten Wirbelgebilde erheblichen Einfluss auf die Qualität der Fluid-Struktur-Wechselwirkung mit der Flossenmembran [Die-15-3]¹⁶.

Ist der Impulsaustausch an der Membranoberfläche groß, verhält sich die biologische Flosse biegenachgiebig-elastisch und weicht einer transversalen Anströmung aus. Die Beaufschlagungs-Formänderungs-Wechselwirkung verhält sich kausal gegenüber beaufschlagenden Krafrichtung und im Sinne eines konventionellen Belastungs- Verformungsregimes mechanisch „orthodox“.

¹⁶Dienst, Mi. (2015). Zur Fluid-Struktur-Wechselwirkung biologischer Finnen. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN (eBook): 978-3-668-00166-4, ISBN (Buch):978-3-668-00167-1.

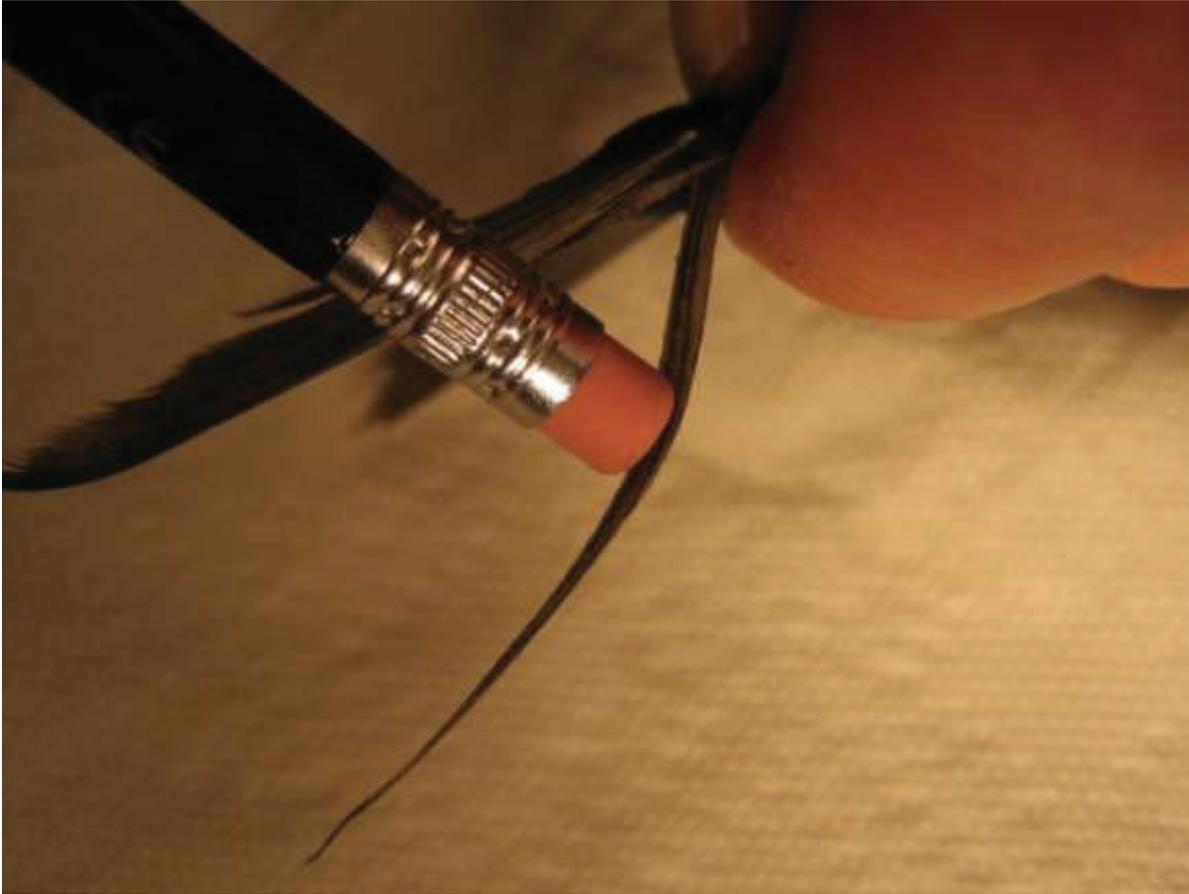


Abb.6: Das nichtorthodoxe Beaufschlagungs-Bewegungs-Gebaren einer Makrelenfinne. Photographische Darstellung, Mi. Dienst (2008)

Im Normalbetrieb aber, technisch gesprochen also „im Auslegungsbereich des Strömungsbauteils“, führen die Flossenstrahlen passiv eine elastische, konkave Verformung aus, deren Krümmung der Belastungsrichtung entgegen-gerichtet ist. Hier zeigt die Fischflosse ein „mechanisch nichtorthodoxes“, ja paradoxes! Verformungsgebaren und eine der Krafteinleitungsrichtung entgegenwirkenden Verformung realisierende Belastungs-Formänderungs- Interaktion.

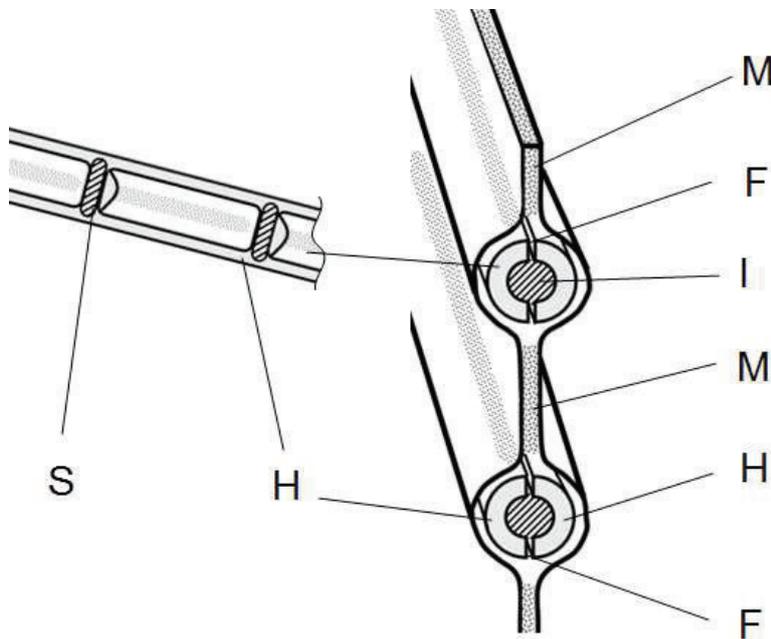


Abb.7: Schematische Darstellung einer Flossenmembran¹⁷. Steg S, Halbtube H, Membran M, Fuge F und Inlet I.

Flossen bestehen aus einer Membrantragfläche (Flossenhaut), die durch Flossenstrahlen stabilisiert ist und in ihrer ausgewogenen Kombination aus Steifigkeit und Flexibilität dem Lebewesen eine fein abgestimmte hydrodynamische Interaktion mit seiner Umgebung ermöglicht.

Grundsätzlich sind Fische in der Lage, mit ihren Flossenmuskeln an der Wurzel der Flossenstrahlen aktiv die Krümmung jedes einzelnen Flossenstrahls zu steuern und damit die gesamte Membran in einer sehr komplexen Weise zu formen. Die Ursache der nichtorthodoxen Krümmung biologischer Flossenmembranen findet sich im bemerkens-

¹⁷Dienst, Mi.(2013) About the nonorthodox Behavior of Fish Fins. IntelligentMechanics (i-mech) in Nature and Design, GRIN-Verlag GmbH München, ISBN 978-3-656-44320-9.

werten Design der biegeflexiblen Innenstruktur der Flossenstrahlen, einer Schar regelmäßig von durch Stege verbundenen, durch ein plastisch verformbare Inlets gedämpfte und mit Flossenhaut ummantelte Halbtubensysteme. Aus der Sichtweise der Bionik stellen strömungsadaptive Tragflächenprofile nach dem Vorbild fluidischer Biosysteme grundsätzlich eine Möglichkeit der passiven Strömungskontrolle dar. Dies führte in der vergangenen Dekade zu einer ambitionierten Erforschung der „intelligenten Mechanik“ biologischer und technischer Flossensysteme.

In mehreren Forschungsvorhaben der Beuth Hochschule für Technik in Berlin Wedding wurden seit 2006 die biologischen Hintergründe "intelligenter Mechanik" betrachtet, an der Wirkungsweise biologischer Flossen die „prinzipielle Lösung“ für artifizielle autoadaptive Profile herausgearbeitet, erste technische Kinematiken entworfen [MIR-05], numerische Lösungsansätze erarbeitet [KRE-08], Systeme mit Fluid-Struktur-Wechselwirkung untersucht [Sie-10], [Sie-11] und Patente für belastungsadaptive Bauteile angemeldet [USP-12][DEP-11]. Da zu dieser Zeit numerische Modelle der Fluid-Struktur-Wechselwirkung nur für ausgesuchte Randbedingungen existierten, wurde im Rahmen der Forschungskampagne eine Prozesskette entwickelt, welche die Lösungen von Körperverformung (Finite Element Methode, FEM) und Strömungsgebiet (Computational Fluid Dynamics, CFD) in einem gemeinsamen Simulationsansatz unter den speziellen Bedingungen hochkomplexer, dynamischer Aussenumströmung miteinander koppelt (Fluid Structure Interaction, FSI). Die Simulations- und Berechnungsergebnisse bildeten dann die Basis für den Entwurf realer Strömungsbauteile mit intelligenter Mechanik.

Die Strömung lesen

Versuchen wir den Energieentkopplungsvorgang einer Fischflosse prinzipiell zu verstehen, kommen wir in dieser Rede nicht umhin, Vereinfachungen und Modelle mit grobem Muster anzusetzen. Es geht zunächst vornehmlich um eine quantitative Anschauung; wir betrachten das Wechselwirkungsgeschehen um eine gewölbte Membran. Dieser Wand (-Randbedingung) begegnet nun eine Wirbelstruktur, die aus der Strömung um eine Störkontur stammt. Zunächst betrachten wir die Membran als biegehart, die Systemgeschwindigkeit V der Strömung sei: $V=v_\infty$.

Aus der Geschwindigkeitsdelle δv , einem lokalen Geschwindigkeitsgradienten, lassen sich über eine Betrachtung des Impulsaustauschs an der Konturoberfläche jene Kräfte herleiten, die in einem zeitlich en Ablauf des Geschehens von der Membran wahrgenommen werden. Menschen, die aus der Zeit der Potentialtheorie stammen, also CFD-ignorante, ältere Typen, verkaufen gerne noch Ladenhüter wie spezifische Geschwindigkeiten und dimensionslose Druckbeiwerte. Die Geschwindigkeitsdelle ist in diesem Sinne und in unseren Betrachtungen eine lokale, konturnahe Geschwindigkeit $v(x,t)$, bzw. die auf die Systemgeschwindigkeit $V=v_\infty$ bezogene spezifische Geschwindigkeit $(v(x,t)/V)$, die zu einem bestimmten Zeitpunkt t an der Membran, respektive der Flosse anliegt. Aus dem dimensionslosen Geschwindigkeitsgradienten $(v(x,t)/V)$ möchte ich nachfolgend eine generalisierte Kraftgröße herleiten: Den Druckbeiwert c_p .

Der spezifische und gleichsam transiente (zeitabhängige) Druck $c_p(t)$ soll mit unserer Flossenkontur wechselwirken. Wir gehen diesen, vielleicht etwas zu kompliziert erscheinenden Weg, um das mechanische Geheimnis der biologischen Flosse grob zu entschlüsseln und versuchen zu beschreiben, aus welchen energetischen Ursachen heraus und mit welcher (möglichen) Struktur-Strömungs-Wechsel-Wirklichkeit das nicht-orthodoxe Verhalten einer idealisierten

Flossenkontur zu verstehen ist. Dazu kläre ich das Strömungsumfeld der Flosse prinzipiell und schematisch und gehe einer eindimensionalen Betrachtung nach, dem Strömungspfad entlang einer (gedachten) Stromlinie.

Der lokale Druck $p(x)$ auf einer Stromlinie nahe der Oberflächenkontur und an einer Stelle x des Strömungspfads wird relativ und auf einen (den) atmosphärischen Normdruck¹⁸ p_0 bezogen angegeben. Für den lokalen Druckkoeffizienten c_p gilt folgende Beziehung¹⁹:

$$c_p = 2 (p(x) - p_0) / (\rho \cdot V^2) \quad [-]$$

$$(p(x) - p_0) = 0.5 \cdot c_p \cdot \rho \cdot V^2 \quad [\text{kg m}^{-3} \cdot \text{m}^2 \text{s}^{-2}], [\text{Nm}^{-2}], [\text{Pa}]$$

Der Druckkoeffizient c_p besitzt einen Gradienten über die Kontur $c_p(x)$ und wird mit der aus der klassischen Strömungsmechanik bekannten Form aus der lokalen, spezifischen Geschwindigkeit bestimmt. Hierbei wird die Bernoulli-Gleichung genutzt, um den Druck aus den Geschwindigkeitskomponenten zu ermitteln.

$$\text{Bernoulli } p_0 + \frac{1}{2} \rho_\infty V^2 = p + \frac{1}{2} \rho_\infty v(x)^2 \quad [\text{Pa}]$$

Für inkompressible Strömungen ($\rho = \rho_\infty$) liefert das den lokalen Druckkoeffizienten $c_p(x) = p(x)/p_0$ aus einer Beziehung über die Systemgeschwindigkeit²⁰ $V = v_\infty$.

$$c_p(x) = 1 - (v(x)/v_\infty)^2 \quad [-]$$

Diese Form ist die vielleicht wichtigste Aussage in der Argumentation dieser Rede. Damit soll die Herkunft des Druckkoeffizienten

¹⁸ Mit dem Normdruck p_0 101 325 [Pa] = 101,325 [kPa] = 1 013,25 [hPa] = 1 013,25 [mbar]. Im atmosphärischen Normzustand bei $T = 273,15$ [K] bzw. $T = 0$ [°C] entsprechend DIN 1343. Wasser im Normzustand bei $T = 20$ °C: Dichte $\rho = 0,998203 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ $\rho = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

¹⁹ Katz, J., Plotkin, A. (2001) Low-Speed Aerodynamics, Cambridge University Press. ISBN 13 978-0-521-66219-2.

²⁰ Sprich: V -unendlich.

$c_p(x) = p(x)/p_0$ aus der Bernoulli-Gleichung geklärt sein, denn meistens und üblicherweise verfügt man eher über Werte der Fluidgeschwindigkeiten, als über Drücke und Kräfte.

Die lokale, wandnahe Geschwindigkeit $v(x)$, bzw. die auf die Systemgeschwindigkeit $V = v_\infty$ bezogene spezifische Geschwindigkeit $(v(x)/V)$ und somit der lokale Druckkoeffizient $c_p(x)$ wäre also ein signifikantes Ergebnis einer potentialtheoretischen Berechnung und steht nun für die Druckintegration über eine Wandkontur zur Verfügung.

$$(p(x) - p_0) = 0.5 \cdot c_p \cdot \rho \cdot V^2$$

$$(p(x) - p_0) = 0.5 \cdot (1 - (v(x)/V)^2) \cdot \rho \cdot V^2 [\text{Pa}]$$

Später werden wir keine Wand, sondern einen Tragflügel, die biologische Fischflosse, betrachten.

In der Regel kann einer potentialtheoretischen Berechnung ein dimensionsloser Auftriebsbeiwert c_L (Lift-Koeffizient) entnommen werden, was den Berechnungsgang auf Kosten einer differenzierten Betrachtung der Auftriebsverteilung über eine Wandkontur erleichtert.

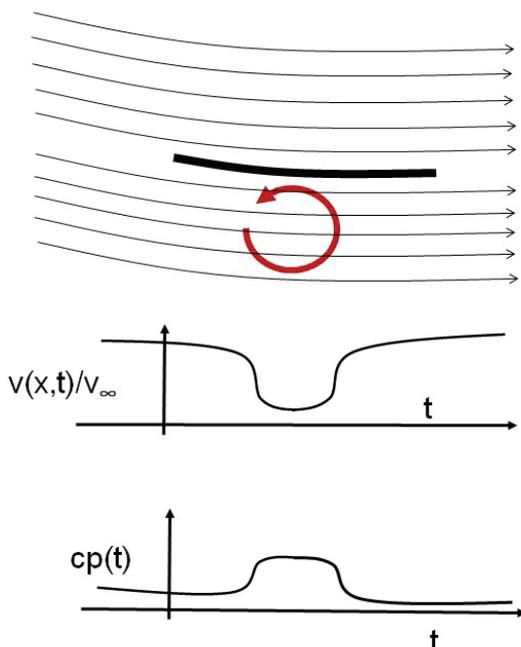


Abb.8: Die generalisierte wandnahe Geschwindigkeit $v(x,t)/v_\infty$ und der Druckbeiwert c_p sind komplementär.

Vergleichen wir, rein narrativ noch einmal den Fin Ray Effekt und die Balkenbiegung oder wie ich sie oben beschrieben habe, das orthodoxe mit dem nichtorthodoxen Wechselwirkungsgeschehen bei einer äußeren fluidischen Krafteinwirkung und untersuchen einen hierbei entstehenden Wirbel qualitativ.

Eine orthodoxe und eine nichtorthodoxe Struktur führt eine „Wedelbewegung“ aus. Auf eine (allmähliche) Auslenkung des Biegebalkens durch die Druckbeaufschlagung bei gleichzeitiger Wirbelbildung erfolgt eine (schlagartige) Relaxation des Balkens und ebenfalls eine Wirbelbildung. Der Orthodoxe Balken generiert zuerst einen kleinen rechtsdrehenden (GRÜN) Wirbel und in der Relaxation einen etwas intensiveren linksdrehenden Wirbel (ROT). Die nichtorthodoxe Balkenstruktur generiert zuerst einen kleinen linksdrehenden Wirbel (ROT) und in der Relaxation einen etwas intensiveren rechtsdrehenden Wirbel (GRÜN).

Orthodox und Nichtorthodox

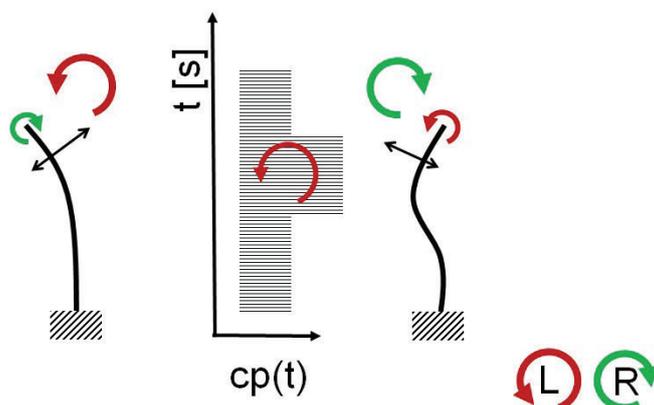
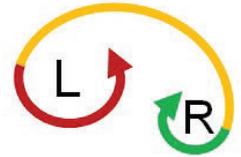


Abb.9: Eine orthodoxe und eine nichtorthodoxe Balkenstruktur (FinRay) werden von einer wirbelbehafteten Strömung beaufschlagt (transienter Druckbeiwert $cp(t)$).

Beaufschlagung und Relaxation. Der Begriff der Relaxation suggeriert irgendwie eine gewisse Verschlafenheit des mechanischen Systems; aber gerade das Gegenteil ist in unserem idealisierten Modell der Fall. Stellen Sie sich das Spannen und das Entspannen eines Bogens vor. Die Systemantwort auf die fluidische Beaufschlagung ist eine Wedelbewegung beider Strukturen.



Die Karman'schen Hufeisenwirbel entstehen in einem L-R-Wirbel-system aber nur die nichtorthodoxe Struktur ergänzt den singulären, vorbeistreichenden Wirbel in der brauchbaren Weise. Wird hier etwa eine evolutiv beantwortete Notwendigkeit sichtbar, musste die belebte Natur jene nichtorthodoxen Flossenstrahlen erst erfinden, um diesen kleinen energiehämsternden Trick zu beherrschen? Die Autoadaptive fluidische Ergänzung. Die Evolution auf jeden Fall nicht, aber DENKT etwa das Tier während des Energieentkoppeln? Braucht es ja nicht, denn es geht alles wie von selbst.

Als ich diesen Text (erstmal) schreibe, befinden wir uns im Jahre 2017. Ich hatte das Geschehen um die, wie wir sie nannten „intelligente Mechanik“, schon seit fast zwanzig Jahren beobachtet, wunderbare Forscherpersönlichkeiten kennengelernt, in ihrem Tun begleiten und den einen oder anderen Aspekt hinzufügen dürfen. Es waren auch einige Fehler begangen worden und nicht wenige meiner Diskussionspartner rieten mir, endlich den Deckel über diese Forschung zu schließen. Vielleicht hätte man aus heutiger Sicht den Aufsatz und alle bisherigen Erkenntnisse auf sich beruhen lassen sollen. Bis zum Herbst 2020 wird dieser Aufsatz noch zweimal in der Schublade verschwinden um dort ein wenig abzulagern.

Wir alle kennen dieses bläuliche Zischeln, das ein unfertiger Fall von sich gibt. Lange widerstehen wir der Versuchung, die Büchse zu öffnen,

Wirbel, Flossen und Kamele

bis an einem formlosen Tag die Geschichte wie selbstverständlich weitererzählt worden sein wird.



Abb. 10: Camels.

Teil II. Die Wahrheit über Kamele, oder: alles könnte anders sein.

Seestraße, Berlin Wedding; gestern. Im Büro der SKYY-Tankstelle, das eigentlich nur ein schmutziger Lagerraum ist.

KEN: Hey, Bruno sieh mal hier. Äh. Chef. Guck mal.

BRO: Wasn?

KEN: Hier! Ich hab Kippen gefunden.

BRO: Lass mich raten. Meine!

KEN: Ne, Chef; CAMEL-Ohne. Hinterm SHELL-Handbuch.

Kevin schüttelt drei krumme Zigaretten aus einem kneuligen Softpack auf das Notizbuch. Sieht alles ziemlich alt und schmuddelig aus. Beide wissen: Natürlich ist das kein SHELL-Handbuch. Zwischen den Deckeln knittert Brunos PLAYMATE-Sammlung vor sich hin.

Bruno zischt jetzt seinen Lehrling an.

BRO: Du kennst die Hausregel EINZZ, Keviinchen!

KEN: Äh, Shell?

BRO: Nein, die andere.

KEN: Ja, Mann. Du die Hälfte, wir Stifte ein Viertel. Aber den Marvin hast Du doch gefeuert? Im Sommer. Somit, krieg ich..

So kennen wir Kevin nicht. Er ist jetzt richtig... sauer?

BRO: Du kennst die Hausregel ZZWEI, Keviinchen! Der Chef hat recht! Bruno wird jetzt laut.

KEN: Mann, Chef, das ist dann nicht mal EINE Fluppe..

Der Kevin kreischt fast.

KEN: Und Deine Dreihalben?

BRO: Genau, Kevienchen, Ick - lass - Dir - ma - ziiin.

Bruno wird lauter.

In diesem Moment guckt Susanna durch den Türspalt. Sie arbeitet in Oma Raschkes Blumenladen nebenan, zieht einen Trolly mit einem sehr großen Karton hinter sich her. Offenbar schwer und kippelig auf den Katzenköpfen.

SUN: Na, Brüünoo, mein Dicker. Was macht das Schräübchen?

Seit Susanna rausbekommen hat, wer hinter der Dauer-Kontaktanzeige im Weddinger Kiezblatt steckt: „Schraube sucht Mutter, Kennwort: Der französische Freund“, geht das so. Beide Männer setzen ziemlich schlagartig eine freundliche Grimasse auf. Was bei mindestens einem von ihnen ein wenig bescheuert aussieht.

KEN: ICH hab hier!! CAMELS gefunden. Eigentlich gehören sie mir!

Kevin wackelt gefährlich mit dem SHELL-Ordner. Dem Bruno bleibt die Luft weg.

BRO: He, Frndschn. Nichso vorlt. Kviinchen.

Bruno hält sich jetzt zurück. Wie sagt er immer (also, in guten Momenten): „Was für‘ne Hammerfrau; voll erotisch, aber SOWAS von frech“. Diese, Susanna, checkt sofort, was hier vor sich geht. CAMELS. Drei für Zwei. SHELL? Und jeder für sich ist ein Gockel, ein Mädchen! Besonders Bruno. Wie sagt sie immer (also, in schwachen Momenten): „Was für‘n Hammertyp; eigentlich. Aber voll viele Macken“.

Wirbel, Flossen und Kamele

Susanna verteilt die krümelnden CAMELS auf der schmierigen Schreibtischunterlage, greift in den Großen Karton, darin sind viele kleine Kartons, knallt eine der Schachteln neben die Zigaretten.

BRO: Hölle, was ist das?

KEN: Das ist doch.. nicht... etwa..

SUN: Wir haben jetzt auch LOVETOYs im Laden. Blumen loofen gerade nicht so gut hier im Wedding. Und: Brüünoo! Change le!!

Mühsam kurbelt dessen Kinnlade gegen die Gravitation an. Susanna trapiert noch einmal alles fein ordentlich auf dem schmuddeligen Schreibtisch.

SUN: So. Ein Viertel von vier ist EINE CAMEL.

Susanna schiebt dem Kevin die Zigarette zu. Der grinst.

SUN: Die Hälfte von vier sind ZWEI CAMEL. Und das ist Meins!

Susanna schnappt sich die rosa Schachtel, wedelt damit dem Bruno jetzt vor der Nase rum, ist schon fast weg, bleibt aber im Türrahmen stehen.

SUN: Bruno, wenn Du irgendwann aufhörst zu rauchen, kommst Du mal rüber und DAS hier (wedelt noch immer) kriegt der Kevin, für seine ARAL-Werkzeugsammlung.

BRO: PFFF....

KEN: Wasn, jetze ... Chef?

Ah, Kundschaft!

BRO: Hier, Kevin. Du kannst SIE ALLE rauchen.

Von Wirbeln kennen wir das Modell ihrer. Wie hat man sich solch einen Walzenwirbel vorzustellen? In Brunos Waschanlage bekommt man so eine vage Vorstellung davon.

Mit einem unangenehm-mechanischen PLOKK-Geräusch klappt der Klappspiegel des alten GOLF3 ein, als die blaue Walze an Blech und Seitenfenster vorbeischiebt. Bis dahin hatte man sich einen Walzenwirbel eher als eine rotierende Gebetsmühle vorzustellen, so etwa, wie man sie aus dem „Tiger von Eschnapur“²¹ kennt. Aber Waschstraßen sind hier im Wedding immer gegenwärtiger als die wunderbare Debra Paget.

Was die Form eines Wirbels betrifft, hat sich die Wirbelwalze oder der Walzenwirbel irgendwie etabliert in der Argumentation um die Fisch-Propulsion. Aber wahrscheinlich stimmt da etwas nicht, an der Form, und: warum bildet der Flossenschlag der Forelle genau den „richtigen“ Wirbel aus; und zwar in der in der Relaxationsphase?

Wirbel. Manchmal habe ich den Eindruck, „der Wirbel an sich!“ sei nur eine Metapher. Für etwas Anderes. Manchmal und immer öfter meine ich, überhaupt nichts mehr zu verstehen, nie etwas verstanden zu haben von Wirbeln. Vom Fluid. Von Strömung, Potential und ja, natürlich nichts vom Patankar²²; aber das ist eine andere Geschichte.

Wie kann solch ein unbedarfter Mensch, einen Aufsatz über Wirbel schreiben wollen? Wahrscheinlich ist das Ganze hier überhaupt keine gute Idee.

²¹ Der Tiger von Eschnapur ist ein Film von Fritz Lang mit Debra Paget und Paul Hubschmid.

²² Suhas V. Patankar (* 22. Februar 1941 in Pune) ist ein indischer Ingenieur mit einer Spezialisierung auf dem Gebiet der CFD. Siehe auch HERMANN-FÖTTINGER-INSTITUT FÜR STRÖMUNGSMECHANIK Finite-Volumen-Methode in der Numerischen Thermofluidodynamik.

http://www.cfd.tu-berlin.de/Vorlesungen/fvm_skript/Main.html

Letztens sah ich einem echten Wirbel beim Wirbeln zu. Ich stand in einer Hausecke, also Innenecke, aber draußen, so wie wenn zwei Häuserteile eine Ecke bilden, so konkav halt, rauchte und sah den Blättern zu – der Herbst hatte bereits begonnen, es war ein windiger Nachmittag – ich sah also den ziemlich großen Blättern zu, wie sie rotierend über den Boden scheuerten. Es war laut, wie man sich das so wünscht in der Rauchpause und die Blätter waren groß – vielleicht von Platanen, das werde ich zeitnah prüfen. (geprüft. Ja Platanen).

Von irgendwoher gesellte sich eine offene Pappschachtel dazu in den Reigen, rotierte mit (nein, jetzt kommt nicht die achte Version vom zwölften Kamele). Da sah ich, dass dies hier gar kein Wirbel war, was ich da beobachtete. Die Schachtel rotierte nicht. Und jetzt sah ich auch: die Blätter selbst rotierten nicht. Bei Blättern ist das nicht so leicht zu erkennen. Erst wenn eine Schachtel - tja, wie soll ich sagen, ortho-normal? – ausgerichtet bleibt, dann gelingt auch das Blätterbetrachten.

Die Kiste rotiert nicht. Das Fluidelement rotiert nicht. Die Strömung ist ein Vektorfeld und sie ist „rotorfrei“. Wir könnten also mit der Potentialtheorie arbeiten. Mitten in der Rauchpause. Genau das geht mir durch den Kopf, wenn ich an reale Wirbel denke, an meine Fahrradpedale. Auch sie ist „rotorfrei“. Bei jeder Umdrehung der Tretkurbel dreht sich meine Pedale genau einmal in der Lagerung. Bei jeder Umdrehung! Wie nennt man das jetzt; diese Pedalenbewegung? Ist das ein „Orbital“? Wäre solch eine ALOA-Bewegung nicht viel besser geeignet, Energie aus einer Strömung zu entkoppeln? Halt-Stopp-Denkfehler. Aloa? davon weiß ja unsere Karman'sche Wirbelstraße gar nichts! Und alles könnte auch anders sein.

Metaphern. Die Geschwindigkeit (in) einer Strömung ist ja ein Vektor. Die Helmholtz-Zerlegung besagt nun, dass man prinzipiell jedes

Vektorfeld \underline{u} in einen rotationsfreien^(ω) und einen divergenzfreien^(Φ) Anteil zerlegen kann also:

$$\underline{c} = \underline{c}^{(\omega)} + \underline{c}^{(\Phi)}$$

Für den „divergenzfreien“ Anteil gilt: $\nabla \underline{c}^{(\omega)} = 0$

Für den „rotationsfreien“ Anteil gilt: $\nabla \times \underline{c}^{(\Phi)} = 0$

Die Wirbelstärke ω ist die Rotation des Geschwindigkeitsfeldes:

$$\Omega = \nabla \times \underline{c} = \nabla \times \underline{c}^{(\omega)} = \text{rot } \underline{c}$$

Und nur dann. Nicht alle rotationsbehafteten Strömungen sind auch gleichzeitig Wirbel. Wirbel aber besitzen ein rotationsbehaftetes Geschwindigkeitsfeld. Bis auf den Potentialwirbel; der ist auf seiner vertikalen Achse rotationsbehaftet.

Fische. Mit welchem Modell gehen wir nun der Frage nach, wie der Fisch Energie entkoppelt und was der Fisch macht, wenn die Wirbelstruktur invalide ist und wie dann der Flossenschlag des Wesens das unvollständige Wirbelsystem ergänzt und was daraus folgt, denn der Fisch ist ja dem „Hufeisen bereits entschwommen“, dann, und wir erkennen: die vierte CAMEL ist kein TOY; daran besteht kein Zweifel.

Auch Geschwindigkeitsfelder sind komplexe metaphorische Konstrukte. Eigentlich weiß ICH nie, wie man sich ein dreidimensionales Geschwindigkeitsfeld überhaupt vorstellen soll. Die Idee mit den kleinen, bunten Vektorpfeilen versagt bei mir vollständig. Kräfte und Beschleunigungen, ja; aber Geschwindigkeiten? Und dann diese NABLAs. Warum ich so begriffsstutzig bin, das möchte ich dem Leser, der Leserin, hier an dieser Stelle erst gar nicht ausentfalten und frage mich stattdessen: was sind Wirbel-Linien, Wirbel-Flächen, Wirbel-

Röhren und Wirbel-Fäden? All die Anderen können sich so etwas vorstellen, nur ich schaffe es nicht, und: insgeheim träume ich davon, mich um diese Fragen herumzumogeln; wollen wir nicht lieber gemeinsam nach neuen benutzbaren Erbteilungsbeispielen suchen? Oder im Wedding stöbern? Gerne, also: $\nabla \underline{u}^{(\omega)}$: bedeutet divergenzfrei im Wedding. Keine Divergenz gibt es dort aber nicht.

Einige grundsätzliche Gedanken zu Wirbeln. Als Wirbel oder Vortex bezeichnet man in der Strömungslehre eine drehende Bewegung von Fluidelementen um eine gerade oder geschwungene Drehachse. Der Begriff des Wirbels ist eher intuitiv – und mathematisch nicht präzise formulierbar. In Fluiden mit niedriger Viskosität (Luft und Wasser) ist die Fließgeschwindigkeit in größeren Wirbeln im Zentrum am größten und nimmt umgekehrt proportional zum Abstand vom Zentrum ab. Die Wirbelstärke ist im Zentrum groß und fast null im äußeren Bereich des Wirbels, weshalb sich Fluidelemente dort kaum um sich selbst drehen. Umgekehrt verhält es sich mit dem Druck, der im Zentrum am niedrigsten ist. Wirbel neigen dazu, ausgedehnte Wirbelröhren auszubilden, die sich mit der Strömung mitbewegen, sich winden, biegen und strecken können. (Wikipedia) Es ist gut, das nochmal so auf den Punkt gebracht, hören zu dürfen.

Wirbel entstehen nicht von selbst. Man kann Wirbel durch Bahnänderung einer Strömung erzwingen, durch andere äußere Kräfte generieren, oder aus einer ausgleichenden Strömung gewinnen. Ein Wirbel ist immer ein materielles, massebehaftetes System. Ein Drehsystem. Also spielt die Erhaltung des Drehimpulses dieser bewegten Masse eine entscheidende Rolle. Aber sind Wirbel wirklich endlich? Davon handelt manche Rede über Wirbelmodelle.

Potentialwirbel. Der Potentialwirbel ist typisch für eine rotorfreie Potentialströmung. Die Fluidelemente des Potentialwirbels „wirbeln“

eben gerade nicht um ein Zentrum herum, sondern machen eine (richtungsgleiche) ALOA-Bewegung, wie in der oben beschriebenen Beobachtung:

$$\text{rot } \underline{u} = 0.$$

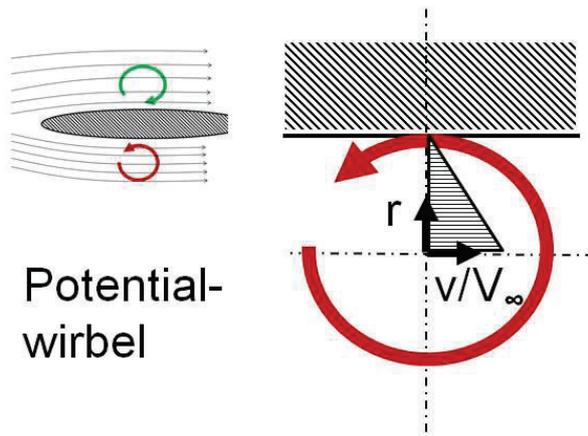
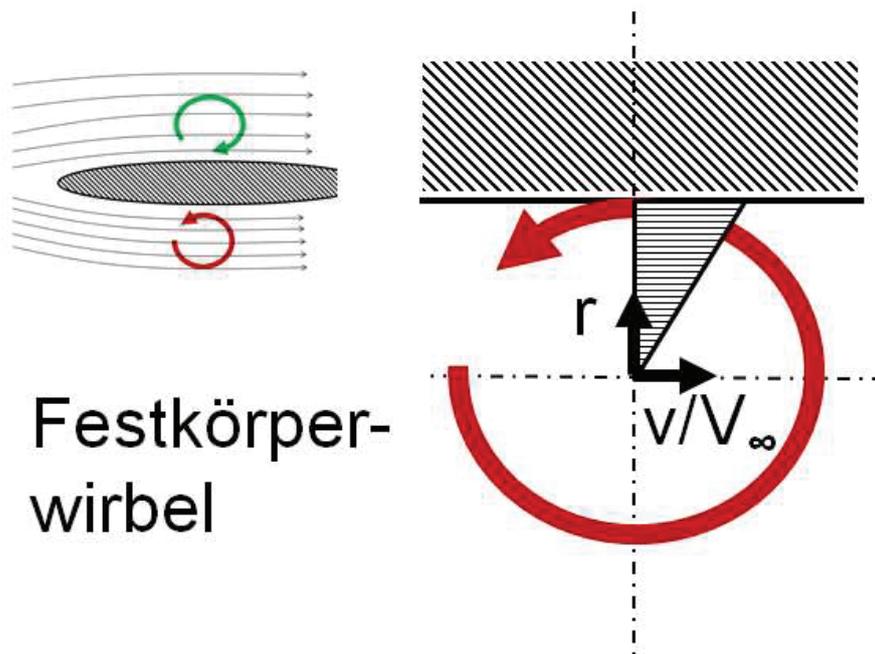


Abb.12: Gradient der generalisierten Geschwindigkeit in einem Potentialwirbel. Zur Kraftgröße: $c_p(r,t) = 1 - (v(r)/v_\infty)^2$

Wollte ich in diesem Narrativ ohne Formeln und Maßbezeichnungen auskommen, so vereinfachen ebensolche den Text doch sehr. Vom Zentrum des ebenen Wirbels betrachten wir den Radius r bis hin zum Rand R . Uns interessiert das Geschwindigkeitsprofil auf dieser endlichen Fläche. Und wieder entschuldige ich mich für diese (rein praktische) Generalisierung der Geschwindigkeit auf eine Hauptströmung mit Betrag und Richtung, denn unsere doch recht speziellen Untersuchungen sollen einem „getragenen Wirbel in einer tragenden Strömung“ gelten.



Festkörper-
wirbel

Abb.13: Gradient der generalisierten Geschwindigkeit in einem Festkörperwirbel. Zur Kraftgröße: $c_p(r,t) = 1 - (v(r)/v_\infty)^2$

Zurück zum Modell des Potentialwirbels. In einer rotorfreien Potentialströmung zeigen die Fluidelemente immer in die gleiche Richtung, was weiterreichende Konsequenzen hat. Die Winkelgeschwindigkeit ω ist im Zentrum ($r=0$) am größten, am Rand ($r=R$) klein²³. Die Geschwindigkeit und der Druck sind wieder komplementär $\{c_p(r,t)=1-(v(r)/v_\infty)^2\}$ also finden wir am Rand die hohen Drücke. Für unsere Energiekopplungs-Geschichte wäre das eine optimale Randbedingung, weil wir in der Fluidbewegung den größten mechanischen Output in der Übertragungszone finden. Aber leider ist die Welt der Wirbel eine

²³ Weil die Rotation „rot“ des Geschwindigkeitsfeldes verschwindet, zeigen die Fluidelemente trotz ihrer kreisenden Bewegung im Wirbel immer in dieselbe Richtung. Wenn man mathematisch genau ist, gilt die obige Gleichung allerdings nur außerhalb des Zentrums, also für während bei Mitnahme des Zentrums gilt, mit der zweidimensionalen Diracschen Deltafunktion und der Wirbelstärke. <https://physik.cosmos-indirekt.de/>

Scheibe. Oder wenigstens ein bisschen. Das probieren wir sofort aus. Wir sehen, dass der Potentialwirbel sich verhält wie eine Schüssel Hefeteig. Der Kochlöffel in der Mitte ist natürlich nicht definiert, hat aber die größte Drehzahl. Physiker könnten das vielleicht verstehen.

Festkörperwirbel. In einem ebenen Festkörperwirbel bewegen sich alle Fluidelemente mit gleicher (Winkel-) Geschwindigkeit $\underline{c} = 2\omega$ auf konzentrischen Bahnen um ein gemeinsames Zentrum. Ein Bierdeckel wäre hier die gute Metapher; räumlich dann: die Gebetsmühle. So einfach und plausibel er auch aussieht, als Modellvorstellung ist er kritisch. Die Geschwindigkeit der Masseteilchen ist außen ($r=R$) am größten im Kern ($r=0$) am geringsten, gleichzeitig wissen wir aus den Überlegungen oben, dass daraus folgt, dass der Druck außen am geringsten, im Innern aber groß ist. Warum aber funktioniert er dann überhaupt?

In der Tankstelle, die in Wirklichkeit das Weddinger POSY-WASH ist, die schmuddelige kleine Waschgarage in der Seestraße, in die SUVs leider nicht reinpassen. Ein 356er würde passen; Bruno weiß aber nicht, was ein 356 sein könnte. Wie die Poser, die hier nachts mit 130 vorbeidonnern. Bruno schüttelt den Kopf.

BRO: Der muss vorher schon kaputt gewesen sein.

Stimmt. Letztes Jahr schon. Auf dem Netto-Parkplatz fährt mir ein kleiner weißer Lieferwagen rein, sagt, „Halt die Fresse, Opa“. Und verschwindet. Wedding eben.

Mi: Hmm. Aber ich brauche die Reste als Muster.

Drähte hängen aus der Beifahrertür. Mein geliebter ONKO. Der Außenspiegel ist jetzt richtig ab. Und weg. Vielleicht ist vom Innenleben noch was zu retten. Der kleine Motor, die Heizung; unglaublich was so ein GOLF3, Baujahr 91 alles drin hat. Andererseits hätte er vielleicht besser ein einfaches Auto bleiben sollen. Es sind ja die elektrischen Türschlösser, die immer als erstes kaputtgehen.

BRO: Ich komm da jetzt nicht rein.

MI: Aha.

BRO: Vollkommen nass da drin. Kommsema.. um..

Susanna betritt das Büro. Sie sieht hinreißend aus und auch nass. Hat heute ihren freien Tag. Und Bruno braucht Hilfe bei der Abrechnung. Auf einem Kehrblech: Krümel, Scherben, Plastik.

SUN: Irgendsonvogel kann da nicht mal auf die Bahn fahrn. Ach, Sie sind das? Regel Nummer eins: Radio aus, dann klappt's auch mit der Mitte, Baby. Und, Bruno: Deine Bürste hat einfach zu viel Wumms. Brüünoo?

BRO: Zu VIEL Power? Das geht doch gar nicht.

SUN: Lass doch die Bürste einfach andersrum laufen.

BRO: Andersrum.

SUN: Dann ist die so weich wie der Matschdöner heute Morgen.

Bruno wird jetzt doch ein bisschen verlegen. Beobachtet seine Schuhspitze dabei, wie sie sich in den Büroboden schmirgelt.

Susanna hatte auf ein After-Work-Frühstück bestanden. Außer Memet in der Kameruner hatte aber noch keiner offen.

BRO: Kevin, holman Flachi für den Kunden. Drüben bei Oma Raschke. Mach schon.

Bruno. Meister des taktischen Themenwechsels. Blumenhaus Raschke hat tatsächlich mehr als nur Blumen. Aber das wissen wir ja schon.

Damals, Mitte der 80er war Memets Döner fast der erste Döner im südlichen Wedding, der wiederum damals noch nicht Mitte war. Aus Memets Kofferradio krächste ein Kurzwellensender wogenförmiges Orient hervor. Eines Abends, die Schlange vor dem verrauchten Telefonhäuschen gegenüber war mal wieder genügend lang, um sich die Zeit mit Abendessen verkürzen zu können, weinte der Memet. Heimlich. Aus Heimweh. Das war ihm sehr peinlich aber dann auch der Anfang einer herzlichen Freundschaft. So verging der Winter. Eines Tages war Memet weg. Einfach nicht mehr da. Ich fand es ein gutes Zeichen. Der Wedding ist jetzt Mitte. Die Post ist schon lange ein NETTO, Telefonzellen gibt's nicht mehr, nur die blöde Ampel schaltet immer schon in der Mitte der Müllerstrasse auf ROT. Und dann erst wieder in fünf Minuten.

BRO: Dreima frei Waschen. Mit Hartsiegel, Ok?

Das wäre jetzt nicht nötig gewesen. Den Döner Kameruner-Ecke-Müller gibt es seit ein paar Jahren wieder – also seit 0015 vielleicht. Ist jetzt untenrum aus Stein, davor immer die Poser-SUVs. Nicht mal die eigenen Leute kommen mit den Kinderwagen durch, ohne von der Schlange angeknarrt zu werden. Es riecht nach 96-Stunden-Deo. Vom Fahrrad steigst du besser ab, hier. Aber: es gibt tatsächlich eine kameruner Kneipe in der Kameruner, sie heißt Kameruner. Immerhin das. Mir geht der Potentialwirbel-Matschdöner noch im Kopf rum. Es rotiert der Spieß. Innen ganz weiß von gestern, außen aber irgendwie noch zu früh und weich.

Der Rankine-Wirbel ist ein Zweisassa. Sein Namensgeber William John Macquorn Rankine (* 1820 in Edinburgh; †1872 in Glasgow) war ein schottischer Physiker und Ingenieur. Rankine-Wirbel stehen für ein Kombinationsmodell aus Potentialwirbelmodell und Festkörperwirbelmodell. Und um die Latte mal gleich sehr hoch zu hängen: Der Rankine-Wirbel ist, wie seine beiden Bestandteile, eine exakte Lösung der Navier-Stokes-Gleichung; diese werden wir nicht behandeln, zollen ihr aber an dieser Stelle absoluten Respekt. Der Rankine-Wirbel verbindet das Modell des Potentialwirbels im Außenbereich ($R < r < r_1$) mit dem Festkörperwirbelmodell im Zentrum ($r_1 < r < 0$). Die Argumentation oben (Potential- und Festkörperwirbel) geht stillschweigend davon aus, dass wir (alle) inzwischen – auf welche Weise auch immer – verstanden haben, was ein Wirbel ist. Für mich trifft das nicht zu. Deshalb nehme ich den Rankine-Ansatz zum Anlass, die „Phänomenologie eines Wirbels“ aus jetzt zu vereinbarenden Grundsätzen zu entwickeln.

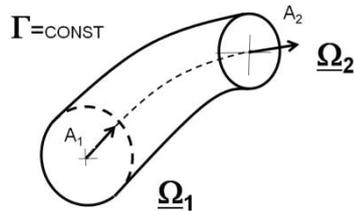
Oben klagte ich vehement, dass ich nicht wüsste, ob der Walzenwirbel eine Weddinger Waschstraßenbürste, oder doch eher eine Gebetsmühle sei. Nach dem zum Potentialwirbel gesagten käme ja wohl noch das Modell eines Matschdöners ins Spiel. Richtig ist natürlich: „die Wirbelröhre“. Die Wirbelstärke $\underline{\Omega}$ ist der rotatorische Anteil der Geschwindigkeit \underline{c} ; gleichzeitig verschwindet die Divergenz jeder Rotation.

$$\begin{aligned}\underline{\Omega} &= \text{rot } \underline{c} \\ \text{div } \underline{\Omega} &= 0.\end{aligned}$$

Der erste Helmholtzsche Wirbelsatz besagt:

- Die Zirkulation längs der Randkurve einer Fläche, die ganz auf dem Mantel einer Wirbelröhre liegt, verschwindet.

- Die Zirkulation um verschiedene Querschnitte einer Wirbelröhre ist gleich.



Den zweiten Teil – er ist der eigentliche Kern des 1. Helmholtzschen Wirbelsatzes (1.HW) - verstehen wir sofort. Zur gleichen Zeit ist die Zirkulation an einem beliebigen Querschnitt A der Wirbelröhre immer gleich. Das ist wirklich

beruhigend, denn konstante Zirkulation würden wir beispielsweise von einem rotierenden Dönerspieß erwarten und gleichzeitig kommt diese Ansage ($\Gamma_1 = \Gamma_2$) daher, wie die Kontinuitätsgleichung auf die wir uns immer und immer verlassen können. Der Helmholtzsche Wirbelsatz und die Kontinuitätsgleichung gelten für jede Strömung ohne Rücksicht auf ihre Ursache. In der Literatur nennt man den 1.HW auch die Kontinuitätsgleichung der Wirbelstärke. Das hat den praktischen Vorteil, dass man einer Wirbelröhre eine Zirkulation ($\Gamma = \text{const}$) zuweisen kann in der Art, wie wir einem (inkompressiblen) Fluid einen konstanten Volumenstrom $dV=0$.

Während die Metapher von der Wirbelröhre physikalisch funktioniert und in meinem Kopf etwas mantelförmiges (vielleicht eine Wurststelle?) auftaucht, denke ich mir den Wirbelfaden als eine Perlenschnur. Und tatsächlich „sehen“ wir sofort, dass sich die Zirkulation ($\Gamma = \text{const}$) auf einem Wirbelfaden gar nicht ändern kann, wenn der 1.HW gilt. Wären wir jetzt Logiker vom Geiste Gödels (...ein unendliches geflochtenes Band²⁴) würde uns sofort auffallen, dass die Konsequenz aus ($\Gamma = c$) sein wird, dass Wirbelfäden im Strömungsfeld nicht enden können. Wirbelröhren auch nicht. Für einen praktischen

²⁴ Gödel, Escher, Bach – ein Endloses Geflochtenes Band, kurz GEB, ist ein Buch von Douglas R. Hofstadter aus dem Jahr 1979. Der Originaltitel lautet: Gödel, Escher, Bach – An Eternal Golden Braid. Die deutsche Übersetzung erschien 1985. Hofstadter sieht in bestimmten selbstbezüglichen Mustern, den von ihm so genannten seltsamen Schleifen, den Schlüssel zum Verständnis von Phänomenen wie Sein oder Bewusstsein. Er stellt diese Muster in seinem Buch vor.

Douglas R. Hofstadter: Gödel, Escher, Bach. An Eternal Golden Braid. Basic Books, New York NY 1979, ISBN 0-465-02685-0.

Menschen, einen Grobmotoriker wie mich, ist das nicht weniger als: die Hölle.

Was sind das nur für dämonische Konstruktionen: WirbelLinien, Wirbel-Flächen, Wirbel-Röhren und Wirbel-Fäden? Und was bedeutet es, wenn Wirbelfäden im Strömungsfeld nicht enden (können). Eine Antwort finden wir in der einschlägigen Literatur, beispielsweise bei Schade und Kunz²⁵:

„Entweder sie (die Wirbelfäden) laufen in sich zurück, wie die Rauchringe eines Zigarettenrauchers, oder sie enden erst an der Grenze des Fluids (an einer Wand oder einer freien Oberfläche), oder sie erstrecken sich bis ins Unendliche“.

Diese Antwort befriedigt nicht. Überhaupt nicht. Und es ist auch keine Erklärung dafür, weshalb es gelingt, eine Wirbelstruktur energetisch ausweiden zu können. Weder von einem Biosystem (Fisch) noch technisch-artifiziell.

Betrachten wir also noch einmal den Mantel einer Wirbelröhre. Hier, an dieser Fläche, haben wir den Austausch von Energie vermutet (...damals, als wir noch an Gebetsmühlen glaubten). Alle Teilchen, die (jemals) den Mantel einer Wirbelröhre gebildet haben, tun dies auch weiterhin (= Definition einer zirkulationserhaltenden Strömung). Das bedeutet, dass durch den Mantel einer Wirbelröhre keine Masse transportiert werden kann.

Die Oberfläche der Wirbelröhre (der Mantel) ist in diesem Sinne inert. Alles, was innerhalb des Mantels ist, bleibt auch dort. Helmholtz sagt: *„Wirbel haften an der Materie!“* Das ist der 2. Helmholtzsche Satz. Der

²⁵Strömungslehre (eBook) - Schade, Heinz; Paschereit, Christian Oliver; Kunz, Ewald; Kameier, Frank. De Gruyter Berlin.

3. Helmholtzsche Satz besagt, was wir vorher (wir sahen oben die Zirkulationserhaltung in den Querschnitten zu einem bestimmten Zeitpunkt) schon vermutet haben: *Die Zirkulation einer Wirbelröhre bleibt auch zeitlich konstant.*

Ich weiß allerdings immer noch nicht, weshalb und aufgrund welches physikalischen Effekts, die Aussagen der Wirbelsätze gelten, aber ich bekomme so langsam eine Ahnung, dass Schlüsse aus phänomenologischen Betrachtungen durchaus nahe am mathematischen Modell liegen. So ist zum Beispiel zu beobachten, dass Wirbel unglaublich stabil sind. Warum Wirbelfäden auch immer zirkulationserhaltend sind, führt diese strukturelle Stabilität dazu, dass sich beispielsweise auf der Haihaut zehntausende kleiner Micro-Wirbelfäden ausbilden, das sehr schnell schwimmende Lebewesen quasi ummanteln und eine turbulente Grenzschicht, die sich aufblähen und platzen könnte, substituieren. Auch das Anfachen eines (sehr energiereichen) Zyklons durch eine Tangentialströmung gelingt ohne allzu große Mühe – und macht diese natürlichen Wetterphänomene so gefährlich. Rauchringe wabern ausgesprochen lange stabil durch die Luft. Ein geübter Raucher kann zeigen, wie der Rauchring entsteht (durch Beschleunigung einer Kernströmung) und gleichzeitig kann ein geübter Physiker erklären, warum die Strömung im Zentrum des Ringes beschleunigt wird, wenn dieser durch das Zimmer fliegt.

Fassen wir das gesagte noch einmal zusammen. Der Rankinewirbel ist ein synthetisches Konstrukt. Die Idee des Rankine-Wirbels ist ein Kombinationsmodell aus Potentialwirbel und Festkörperwirbel. Im Modell gibt es einen signifikanten Radius r_1 und mit dem Verhältnis r_1/r , einem generalisierten Radius. Die Wirbelstärke des Wirbelkerns sei Ω_0 . Betrachten wir zuerst die Geschwindigkeitsverteilung über den generalisierten Radius.

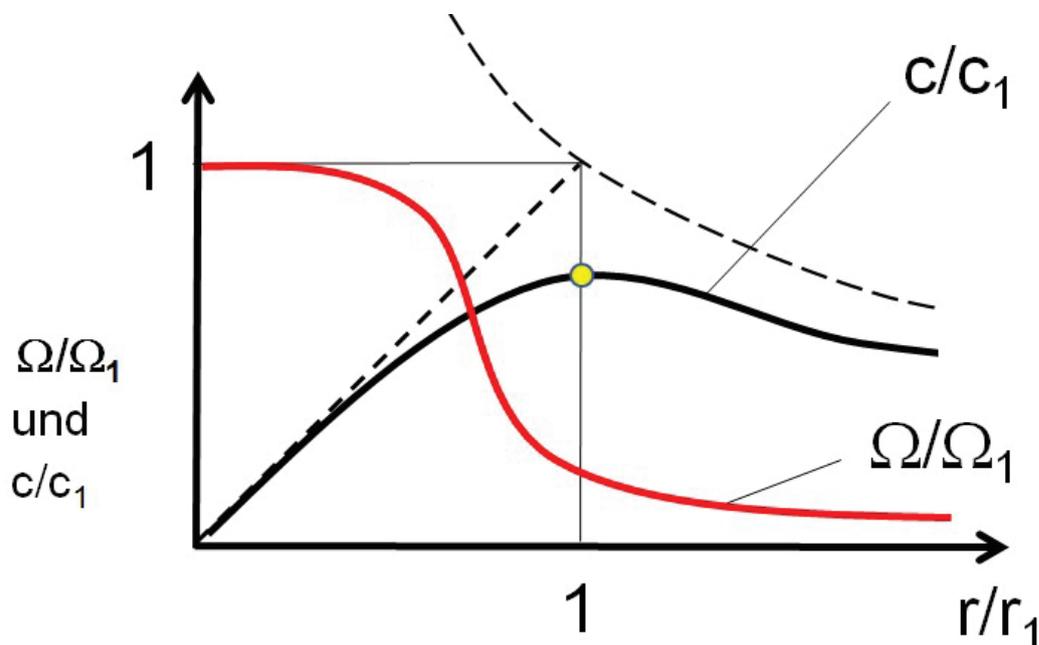


Abb.15: Geschwindigkeitsverteilung und Zirkulationsstärkeverteilung (rot) über einen generalisierten Radius beim Rankine-Wirbel.

Rankine nahm an, dass sich im Innern eines realen Wirbelfadens immer ein Wirbelkern ($r < r_1$) befindet, in dem das Fluid wie ein starrer Körper rotiert. Das ist die Potentialwirbel-Komponente für Radien $r < r_1$. Die Geschwindigkeitsverteilung c/c_1 besitzt ein Maximum in der Nähe des signifikanten Radius. $r/r_1 = 1$, mit $c_{MAX} = \Gamma/2\pi r_1$. Das ergibt sich direkt aus der Geschwindigkeits- und Zirkulationsverteilung über den generalisierten Radius.

Die Geschwindigkeit	$c(r) = r \Omega_0/2$	für $r < r_1$
	$c(r) = (r_1^2/r) \Omega_0/2$	für $r > r_1$
Die Zirkulation	$\Gamma(r) = \pi r^2 \Omega_0$	für $r < r_1$
	$\Gamma(r) = \pi r_1^2 \Omega_0$	für $r > r_1$

Dort, wo die beiden Teilmodelle überlappen könnten, ist die Kurve (eigentlich) nicht definiert. Theoretisch. Und es gibt natürlich

verbesserte Modelle. Hamel und Oseen²⁶ haben eine Formel angegeben, die die Navier-Stokes Gleichung exakt löst, das sei hier nur am Rande erwähnt. Betrachten wir die Kurve c/c_1 des Rankine-Wirbels können wir uns (zumindest ein wenig) vom Modell der Geschwindigkeitsverhältnissen in der Randzone des Potentialwirbels lösen. Die Geschwindigkeit am Radius einer Wirbelwalze liegt offenbar unterhalb der des Modells des Festkörperwirbels und ist zumindest nicht Null (Potentialwirbel). Wir kommen nicht wirklich weiter. Letztlich hängen wir wieder an der Gebetsmühle, der Waschstraßenbürste (COSY), beziehungsweise der Weddinger Variante eines in den Randzonen erweichten Dönerspießes von gestern. Das Problem ist, dass wir nicht wissen, wie diese einerseits „weichen“ andererseits ausgesprochen „stabilen“ Strukturen tatsächlich aussehen (mögen). Mit Fehlinterpretationen physikalischer Mechanismen stehen wir nicht alleine da. Die fluidmechanischen Eigenschaften von Wirbelstrukturen sind hundertfünfzig Jahre nach den Wirbelsätzen, Helmholtz war Zeitgenosse Karl Marx's, immer noch Gegenstand aktueller Forschung.

Wirbelstrukturen sind sehr stabil. Im Sinne von: „sie erhalten lange ihre einmal erworbene Topologie“. Sie sind „kohärent“, für eine gewisse Zeit. Wenn Wirbel langsam wegschwimmen, wie etwa ein Rauchwirbel, beobachtet man einstweilen ein merkwürdiges Wabern. Oder auch ein Wachsen, aber immer ein Zusammenbleiben. Die Topologie des Formsystems bleibt gleich. Ein Kreis bleibt ein Kreis, eine Brezel eine Brezel. Bei einem Torus (vulgär: Ring) bleibt im Zentrum ein (vulgär:) Loch. Es kommt kein zweites hinzu. Man sagt auch: das Geschlecht bleibt erhalten.

²⁶ Der Hamel-Oseen'sche oder Lamb-Oseen'sche Wirbel (von Carl Wilhelm Oseen, Georg Hamel, Horace Lamb, im Folgenden einfach Oseen'scher Wirbel) ist ein mathematisches Modell einer Wirbelströmung eines linear viskosen, inkompressiblen Fluids. Das Geschwindigkeitsfeld von Strömungen solcher Fluide wird in der Strömungsmechanik mit den Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben, die vom Oseen'schen Wirbel exakt erfüllt werden. Das Fluid strömt rein kreisförmig jedoch zeitabhängig, instationär um das Wirbelzentrum. (Wikipedia) Siehe auch: M. Bestehorn: Hydrodynamik und Strukturbildung. Springer, 2006, ISBN 978-3-540-33796-6, S. 380. F. Kameier, C. O. Paschereit: Strömungslehre. Walter de Gruyter, 2013, ISBN 978-3-11-018972-8, S. 274 ff.

Das Lebensende einer Wirbelstruktur kann plötzlich auftreten. Gelegentlich beobachtet man, dass eine Wirbelstruktur „implodiert“? Das ist seltsam. Und nicht nur seltsam. Die Antwort auf die Frage, wie es dem Fisch gelingt, aus einer Wirbelstruktur Energie zu entkoppeln, gerät immer weiter ins Schwererergreifbare, ins Schwerbegreifbare.

Übrigens, unser Kevin raucht nicht mehr. Was das jetzt wieder zu bedeuten hat, kann ich mir auch nicht erklären. Ein anderer Rauchringbläser – nennen wir ihn der Einfachheit halber nicht Kevin, sondern Onkel Willi – pustet geschickt und erzeugt einen (Fluid-) Strahl hoher Geschwindigkeit genau so, dass ein Ringwirbel entsteht. Wabernd schwimmt dieser achterlich fort von seinem Entstehungsort. Onkel Willi hat uns Kindern das gerne vorgeführt damals, als er noch nicht zum Rauchen auf den Balkon musste. In der belebten Natur – und nicht nur dort – erzeugt ein von einem Lebewesen generierter Ringwirbel die Beschleunigung eines diskreten Massestroms. Rudi B., auch ein Raucher, zeigte mir in einem spektakulären Video (zwischen zwei Rauchpausen, hätte ich beinahe geschrieben) die Farbspuren der Wirbelfäden „fliegender“ Pinguine in einem Wasserkanal. Die Aufnahmen stammen aus Experimenten, die in einem (gläsernen) Schwimmtank mit lebenden Pinguinen durchgeführt wurden. Die DDR-Polar-Forschungsstation befand sich auf einer Insel nahe dem Südpol im Bereich der sowjetischen Station Bellingshausen auf der King-George-Insel in der Gruppe der Süd-Shetland-Inseln. In Berlin und nach dem Mauerfall kam es dort, wo Ost- und West-Institute gemeinsam weiterforschten, zu Kooperationen, wissenschaftlichen Symbiosen und menschlichen Freundschaften.

Pinguine sind gesellige und äußerst gelehrige Wesen und hatten sichtlich Spaß daran, im Schwimmkanal hin- und herzusausen. Außerdem gab es gelegentlich einen frisch gefangenen Fisch zur Belohnung. Sobald die Berliner Forscher im arktischen Sommer auf King-George auftauchten, versammelten sich die neugierigsten Insulaner vor dem kleinen hölzernen Stationshäuschen. Im Laufe der

Jahre rückte die gesamte Pinguinkolonie immer näher und näher an die Forschungsstation heran. Genau diesen Umstand nahmen wenig später eilfertige Naturschützer zum Anlass, die Außerbetriebnahme der „OST“-Polarstation zu fordern. Man war darüber hinaus der Meinung, dass es im wiedervereinten Deutschland fortan keiner zwei Südpolstationen bedürfe. Ein letztes Mal fahren die Berliner Polarforscher zum Südpol, Farbeimer statt Messgeräte im Gepäck. Den Zuhausegebliebenen erreichen die allerletzten Fotos von King-George; sie zeigen keine Pinguine, sondern den Chef, den Rudi und ein paar andere traurige Gestalten, wie sie sich von den Insulanern verabschieden, die alte DDR-Polarstation aufräumen und piko-bello rot-weiß anstreichen, um sie würdevoll einer ungewissen Zukunft zu überlassen.

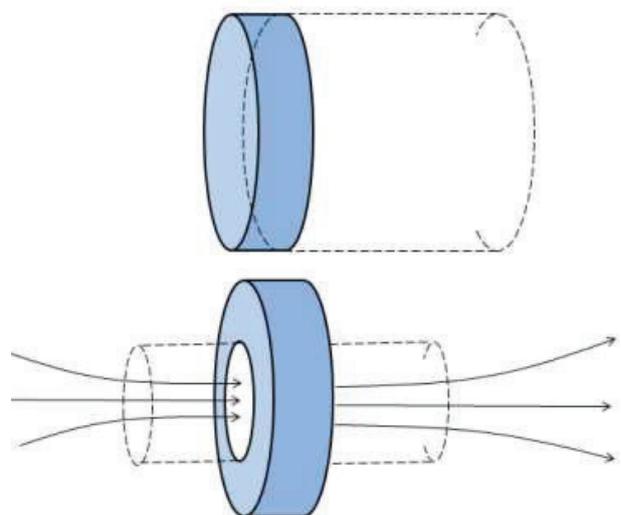
Beim aktiven Pinguinflug ist die Relativgeschwindigkeit der Tragflügelspitzen kurzzeitig kleiner als Null, der Flügel fährt gegen die Hauptbewegungsrichtung des Körpers vor und mein erster Gedanke ist: warum macht dieses Tier das? Wir werden das Phänomen hier nicht klären oder auch nur ein ganz klein wenig zu seiner Entschlüsselung beitragen, aber die Botschaft von Willi und Rudi ist bedeutungsvoll: der Prozess der induzierten Massenbeschleunigung funktioniert offenbar in beiderlei Richtung. Während der Rauchringbläser den Fluidstrom einen Ringwirbel, besagten Torus generieren lässt, ist der Pinguin selbst die Masse, die im Ringwirbel beschleunigt wird. Zwar sind sowohl der kompakte Ringwirbel als auch die Wirbelröhre Formengebilde unterschiedlichen topologischen Geschlechts, aber aus topologischer Sicht besteht zwischen einer Scheibe etwa und einem Zylinder natürlich kein Unterschied. Das leuchtet nicht unmittelbar ein und die Topologiegleiche erklärt auch nicht Kohärenz und Stabilität von Wirbelstrukturen.

Im Gegenteil. Versuchen wir also nun, die unterschiedlichen Phänomene zu ordnen und zu entflechten. Wir sehen, dass der

Ringwirbel ein Geschwindigkeitsfeld in seinem Zentrum „induziert“. Der Wirbel ist das Erzeugendensystem und „macht“ was mit dem ihn umgebenden Strömungsfeld. In einem (reversiblen) Spiegelbild der Phänomene „produziert“ eine beschleunigte (Innen-) Strömung einen Torus, der als Ringwirbel davonschwebt. Der (diskrete) Strahl ist nun das Erzeugendensystem. Wie ist diese Autoreferenz zu verstehen? Wie erklären wir den Umstand, dass ein Fisch in der Lage ist, aus einer Wirbelstruktur Energie zu entkoppeln?

Transformationen, bei denen Randpunkte wieder in Randpunkte übergehen und benachbarte Konturpunkte in der Verformung ihre Nachbarschaft erhalten sind topologisch äquivalent oder homöomorph. Strecken, Geraden, Kurven und auch Winkel können sich bei diesem Vorgang durchaus verändern; Die transformierten Strukturen dürfen - bei gleichem Erzeugendensystem - sogar extrem von ihrer Ursprungsgestalt abweichen. Immer wird es sich um Verwandlungen handeln, bei denen die Proportionalität geometrische Beziehungen erhalten bleibt. Verwendeten die Helmholtzschen Wirbelsätze nicht ein entsprechendes Narrativ?

Nicht unmittelbar finden wir eine homöomorphe Transformation, die eine Röhre erzeugt, oder eine Pille, einen Zylinder oder eine Röhre. Gleichsam kommen uns diese Strukturen „natürlich“ vor. Aber wie entstehen sie? Offenbar findet hier ein Vorgang statt, der proportionalitätserhaltene Prozesse fixiert, oder durch irgendetwas anders ersetzt. Da wir uns auf diesem Weg an einem kritischen Punkt befinden, machen



wir uns nun in einem Gedankenexperiment auf die Suche nach den Zwischenschritten von einer Fadenstruktur zu einer Röhrengestalt. Das Ziel dieser Untersuchung wäre nicht weniger als das Aufspüren von Emergenz, dem Auftauchen neuer Qualitäten in der betrachteten fluidischen Struktur oder um sie herum. Wird es uns also gelingen, die Transformation eines Wirbelfadens in eine Wirbelröhre in homöomorphe Zwischenschritte zu zerlegen? Wir könnten dann erklären, wie sich das Auftauchen einer neuen Qualität (Emergenz) in der Verwandlung eines Wirbel-fadens in eine Wirbelröhre vollzieht. Hier ist ein narrativer semiologischer Ansatz, der die Betrachtung von Bedeutungen bevorzugt, also durchaus erwünscht.

Verwandelt sich – unerlaubter Weise – eine Pille in einen Torus, verändert sich Qualität und Gestalt der Struktur. Zuerst sehen wir – und daran sollte man sich nicht stören – dass die neue Qualität des fluidischen Systems aus einem ordinären Loch besteht. Dieses Loch existiert als konzentrische Nicht-Struktur. Das Loch ist quasi die „Abwesenheit“ von Wirbelkörperstruktur. Wenn wir so etwas wie Zufall erst einmal ausschließen wollen, kann es sich beim Auftauchen des Lochs also nur um ein Wunder handeln. Das ist natürlich alles andere als wissenschaftlich plausibel, sondern einfach nur wunderbar. Für Wunder werden gelegentlich in der Physik, ganz besonders gerne in der klassischen Strömungsmechanik, „Dämonen“ postuliert. Eine gewisse Berühmtheit hat in der Thermodynamik jener „Maxwell'sche Dämon“ erlangt, der uns die ansonsten und ohne ihn nicht zu verstehende Entropie erklärt.

So auch hier. Erst mit Dämonen könnten wir homöomorphe Zwischenschritte verstehen. Als Thermodynamik-Laien extrudieren wir aus einer anschaulichen Scheibe anschaulich einen Zylinder und extrahieren fortan aus einem anschaulichen Wirbelfaden eine linienförmige Geometrie, die stromabwärts aus einer Wirbelquelle stammend abfließen mag. Anschaulich aber es ist unmöglich, eine nicht-homöomorphe Abbildung, die einen Vorgang beschreiben,

benennen bzw. im semiologischen Sinn bedeuten soll, in homöomorphe Zwischenschritte zu zerlegen. Konkret: die nichthomöomorphe Abbildung einer Wirbelröhre ist keine Komposition homöomorpher Abbildungen. Selbst unser fluidmechanische Dämon verschiebt das Problem nur auf eine andere Ebene, die wir nun ihrerseits zerlegen, analysieren und erklären müssten. Wie wir unsere Röhre auch wenden oder drehen und mit unserer Scheibe, oder der schon einmal exprimierten Zylinderförmigen Wirbelfaden vergleichen, wie abstrakt wir diesen Vorgang auch anfassen und wie fein wir es in Teiltransformationen beschreiben, auf der mathematischen Ebene, der (konformen) Abbildung einer Struktur auf einer Struktur stoßen wir allendhalben auf Unlösbares. Der Antwort auf die Frage nach einer Energieübertragung aus einem Wirbel heraus sind wir nicht einen einzigen Millimeter näher gekommen. Dabei ist es nicht einmal ein Trost, dass keine Ortsveränderung kontinuierlich verläuft, sowenig sich Emergenz kontinuierlich vollzieht. Die Lösung dieses Dilemma liegt fern der topologischen Unveränderlichkeit oder in der Statik der Strukturen, sondern ist in der Dynamik der „Formen“ zu suchen. Wir erkennen, der Zeitbegriff ist in diesem Zusammenhang keinen Falls trivial. Insbesondere dann, wenn in einem Gemenge aus Struktur, Koordinatenzeit beziehungsweise Form und Eigenzeit was immer das bedeuten mag, auftaucht.

Struktur ist uns ein abstrakter Begriff. Mathematisch gesehen ist eine Struktur eine geordnete Menge gleicher oder zumindest ähnlicher Dinge. In einer geordneten Menge ähnlicher Dinge ist für alle Elemente eine Verknüpfungsoperation definiert. Struktur drückt die Ordnung unseres Modells mit mathematischen Vokabeln aus. Ein Modell muss nicht homogen sein, sondern darf Untermengen besitzen, Elemente etwa und kann auf unterschiedlich Weisen auf ein anderes Modell abgebildet werden. Ist die Abbildung iterativ und besteht aus diskreten Schritten, nähert sich die Struktur einer Form allmählich an. Sagen wir es so: Mit zunehmender Iteration wird Struktur formiger.

Der Wesenskern einer Iteration ist das schrittweise Voranschreiten. Weil Strukturen geordnete Mengen sind, wird der Übergang einer Struktur in eine Form in einem iterativen Kontext zu einem Phänomen des Prozesses. Nur wenn die Möglichkeit einer Abbildung zwischen einem Anfangszustand und einem Endzustand gegeben ist, also ein „Morphismus“ existiert, nur dann also darf das Abbildungs-Phänomen welches innerhalb eines Prozesses auftaucht „Emergenz“ genannt werden. Morphismen - das sagten wir oben - sind streng strukturerhaltend. Wenn diese Möglichkeit der konformen Abbildung nicht gegeben ist, existiert auch kein funktionaler Zusammenhang im mathematischen Sinn. Funktionen sind immer Abbildungen zwischen geordneten Mengen, also Strukturen. Im dreidimensionalen Raum ist eine Oberfläche dann homöomorph zu einer Kugeloberfläche, wenn sich jede geschlossene Schleife auf dieser Fläche zu einem Punkt zusammenziehen lässt. Eine Möglichkeit dieses Dilemma aufzulösen oder wenigstens zu unterwandern, wäre die Superposition von - gegebenenfalls elementaren - strukturerhaltenden Abbildungen, etwa dann, wenn die Anfangsbedingungen nahezu zwangsläufig ein komplexes Endergebnis die Zielgerade erreichen. Dieses „Übereinanderprojizieren strukturerhaltender Abbildungen“ emuliert den Übergang einer Struktur in eine Form und Niemand wird uns am Ende der Reise davon entlasten, eine exakte Transformation aus einem Anfangszustand in einen Endzustand zu zeigen. Schon gar nicht werden wir aus der Frage entlassen, wie es zu einem Transfer von Energie und Impuls aus einer Wirbelstruktur auf einen Fisch oder ein artifizielles System kommen kann. Legen wir also die nächste Ebene theoretischer Konstruktionen über das Wesen der Wirbel frei.

Welche Rolle spielt die Dimension einer Form? Wir stellen zu keiner Zeit in Frage, dass ein linienförmiges Konstrukt mit der Dimension 1 aus der unendlichfachen Aneinanderreihung null-dimensionaler Elemente entstehen darf. Ich sage dann immer: „die Linie ist die Spur

eines Punktes; die Fläche ist die Spur einer Linie und der dreidimensionale Raum ist die Spur einer Fläche“. In unserem Emergenzdilemma spielt der Begriff des „Geschlechts“ einer Topologie vielleicht doch eine wichtige Rolle. Die Kugel hat das Geschlecht 0, ein Torus hat das Geschlecht 1. Ein Torus ist in diesem Sinne ein Becher (nullter Dimension, einsprechend einer Kugel) der einen Henkel hat, also eine Tasse ist oder sein könnte. Das Geschlecht bestimmt sich in der Topologie einfach nach der Anzahl der Henkel. Wandert eine Ameise über die Oberfläche einer Kugel (einer Topologie vom Geschlecht 0) und erreicht auf kürzestem Wege ihren Ausgangspunkt, wird sie die Startmarke ihrer Reise „in gleicher Richtung“ passieren. Der Spaziergang der Ameise war also ein Rundkurs. Anders beim Torus. Dieser ist vom Geschlecht 1. Die kleine Ameise erreicht ihren Startpunkt nach einer kurzen Reise in der umgekehrten Richtung (Anmerkung: beim Regattasegeln denkt man sich einen am Heck des Bootes ausgelassenen Faden, der beliebig gefaltet sein könnte aber nicht überfahren werden darf, so dass keinerlei Schlaufe entsteht. Dies nennt man einen „proper course“. Die Ameisenwanderung auf dem Torus endet am Startpunkt in der „verkehrten Richtung“.

Poincaré grenzt den Torus von der Kugeloberfläche in etwas wissenschaftlicher Weise ab, wenn er vermutet, dass alle geometrische Gebilde zu einer Kugel deformiert werden können immer dann, wenn ihre von einer zweidimensionalen Oberfläche umschlossene Form keine Löcher enthält. Bei Becher und Tasse erhöhen die Henkel (Löcher) die Anzahl der geschlossenen Kurven, die man auf der Oberfläche des Körpers zeichnen kann, ohne die Oberfläche in zwei oder mehrere Gebiete zu zerlegen. Wie soll es dann aber möglich sein, eine Abbildung der Kugel vom Geschlecht 0 auf einen Torus vom Geschlecht 1, respektive eine Abbildung der Pille (vom Geschlecht 0) auf eine Röhre vom Geschlecht 1 zu finden. Der Zylinder ist die Spur einer Pille; sie beide sind vom Geschlecht 0. Aber die Röhre (vom Geschlecht 1) ist nicht die Spur des Zylinders! Wir

finden zunächst einmal keine Transformation hierfür. Von der Mathematik dürfen wir an dieser Stelle keinerlei Milde erwarten. Sie sagt: Körper unterschiedlichen Geschlechts sind aufeinander nicht abbildbar! Zunächst. Dürfen für eine „Strömungswirklichkeit“, also für einen empirisch-physikalischen Vorgang im Sinne eines „dynamischen Strömungsprozesses“ andere Grundsätze formuliert werden, als für eine mathematische, ebenfalls in diesem Sinne, „statische“ Abbildung? Welche Verfahren finden wir in unserem Methodenkoffer vor? Vielleicht besitzen Wirbel ja ein eigenes Regelwerk ihrer Topologie; eine eigene Wirbel-Algebra? Vernünftiger Weise sollte das nicht der Fall sein oder der allerletzte Ausweg?

Spulen

Im Innenhof führt eine kleine Treppe in die Kellerräume des Altbaus, in dem, zur Seestraße hin, Gudruns Blumenladen einen kleinen Verkaufsraum zu ebener Erde hat. Der Innenhof ist hübsch angelegt, ein kleiner Sandkasten umringt von niedrigwachsenden Sträuchern, robusten Blumen und irgendwas Erntebarem, wie Bruno vermutet, vielleicht Bohnen. Eine Werkzeugkiste neben sich, obendrauf eine ziemlich verschrammte Bohrmaschine, lümmelt Bruno auf der kleinen Bank und schnippt seine Zigarettenasche in eine alte Ofenkachel, versucht irgendwas hinter den kleinen Butzenscheiben zu erkennen, die nach seiner Ansicht zum Blumenladen im Vorderhaus gehören könnten; kleine Bewegungen im Schatten und Licht, vielleicht ist es ja Susanna.

Gudrun hatte Bruno am Montag gefragt, ob er helfen könne, ihre alte Scherre zu reparieren. Oder Esel, oder Sessel? Ja, er hat an alles, gut manches dann gedacht, Hammer, Zange, Schraubenzieher und eine Schachtel Polsternägel verschiedener Größe aufgestöbert, die er vor geraumer Zeit mit der Werkstatt – ja, ok dem alten Lagerraum seiner Waschgarage, aber er nennt es halt gerne seine Werkstatt – vom alten Bechstein - übernommen hat und auch das Marmeladenglas mit den gesammelten, heiligen Schrauben mitgebracht. Im Bauhaus kauft man ja immer etwas mehr als man wirklich braucht und beim Basteln bleiben sowieso meistens Teile übrig.

Damals in der Lehre schenkte ihm der Meister mit der Zeit allerlei nützliches Werkzeug, zum Beispiel einen „Würger“ mit dem man abgebrochene Bolzen linksherum rausdrehen konnte und seine ersten Nüsse 13, 15, 17, 19 mit einem Knebel; alt, ein bisschen angeschrubbelt aber aus VA-Stahl wie der Meister versicherte, und „nicht aus dem Baumarkt“. Das erste aber, was der Meiser ihm – ja irgendwie feierlich - überreichte war das ebendieses Marmeladenglas. Alles hätte so gut sein können, besser werden, aber Bruno hatte es verbockt; der Bechstein war so dermaßen ausgetickt. Und nicht zum ersten Mal. An dem Tag, an dem er ihn dann rausschmiss, hatte Bechstein Tränen in den Augen. Bruno hatte das damals nicht verstanden. Heute aber schon. So hängt Bruno also finsternen Gedanken nach, als hinter ihm quietschend eine Tür geöffnet wird. „Bruno, wie schön“, Gudrun in ihrer Latzhose kommt die drei langen Stufen in den Innenhof fast angefliegen, die kurze Umarmung ist ihm sichtlich unangenehm. Gudrun, so eine alte Frau. Wie meine Oma, früher. Die älteste Frau die Bruno kennt, ist Gudrun. Eine Umarmung mit Oma ist ja auch schon ewig her. Bruno kommt auf zwölf Jahre; über zwölf sogar. Um genau zu sein. „Bruno, ist alles in Ordnung mit Dir? Du guckst so gläsern, hast Du?, ... egal“. Die Treppe in den Keller hat neben den Stufen noch eine Steinrutsche auf der linken Seite. Wegen den Fahrrädern, denkt Bruno gerade und als hätte Gudrun seine Gedanken gelesen, sagt sie: wegen

der Kohlensäcke. Ofenheizung hatten wir damals, Außenklo, sowas halt.

„Ich musste nur an früher denken, als ich noch klein war“. Der Werkzeugkasten schrammt an das kleine Mäuerchen, das den Aufgang in den Keller zum Hinterhof hin einfasst.

Oh. Der Keller ist riesig, fast wie ein Bunker aus dem Fernsehen. In den Regalen sind Tontöpfe übereinandergestapelt, Dosen, ein Kehrblech mit Besen baumelt an der Wand und Bruno stößt sich den Kopf an irgendeinem Rohr über ihm. Endlich wird es hell. Das leise Pling-pling der Neonröhren gibt die Sicht auf eine Art Gatter frei.

„Mein Reich“. Oma Raschke zieht die quietschende Gattertür auf, sie wabert irgendwie – alles ist unverschlossen hier unten, Lichtstrahlen tanzen im Staub - und der Bruno ist sichtlich beeindruckt. An den Wänden, Regale und Ringmaulschlüssel, Eisensäge, verschiedene Hammer der Größe nach, eine ganze Regalwand mit unterschiedlich großen offenen Kästchen – Schäferkästen hießen die beim alten Bechstein, erinnert sich Bruno - eine Ständerbohrmaschine, eine Schleifmaschine mit einer grauen und einer rosa Scheibe, ein grüner Stahlschrank mit beschrifteten Schüben, Bruno liest: LötKolben, Schlagzahlen, Schraubendreher, also Schraubenzieher, Bruno fühlt die kleine Kopfnuss des Meiser Bechstein und muss grinsen, was der Gudrun nicht entgeht.

„Hier, deshalb brauch ich einen starken Mann, heute. Könntest Du mir helfen, sie hier hoch zu rollen? „Gudrun deutet auf einen niedrigen, ja was denn, einen Tisch?

Und diese Sie, ist .. „ei...ein Moped?“ Bruno versteht die Welt nicht mehr. Einen Rollator hätte er erwartet, einen Rentnerporsche, also so einen Einkaufsrolli, Sessel, Sofas, Stühle, aber ein Moped?

„Deins?, Oma Raschke, Du willst doch nicht etwa sagen, dass Du schon mal auf einem.. also jemals... „

„Das ist kein Moped, das ist eine SL 100 und ja, meine Honda. Meine Scrambler. SCR 100, Baujahr 72 und gut in Schuss. Mann Bruno, und

ob ich schon mal gefahren bin? Das ist ja wohl lachhaft. Die hat jetzt 56.000 auf der Uhr. Morgen früh fahre ich nach Wannsee, das heißt, falls Du mir kurz hilfst, natürlich nur, sie hier auf die Bühne zu setzen, runter krieg ich sie später auch alleine“.

Oma Raschke hat sich in Rage geredet, lacht aber irgendwie dabei, genießt den Augenblick, genießt den vollkommen verblüfften Bruno, hört quasi die kleinen Zahnräder in seinem Hirn sich knirschend in Bewegung setzen, genießt desweiteren das Groschenfallensehen; ein guter Junge, denkt sie, aber ein bisschen, tja, was denn, naiv?

„Können wir erst mal noch eine rauchen gehen? Und Du erklärst mir noch einmal ganz von vorne, was hier eigentlich so krass abgeht, gerade? Dein Sessel ist also in Wirklichkeit ein Mo., eine SL100, ES-EL, wie lustig, verstehe.“

„Die Scrambler kommt nicht von DUCATI sondern von HONDA, verstehe, Du bist nicht hauptberuflich Blumenfrau, sondern eine superscharfe Schrauberbraut, alles klar. Deshalb steht Gudrun wohl für Good Run? Ha, der ist gut, oder?. Und in Wirklichkeit bist Du auch nicht Susannas Oma, sondern ihre kleine Schwester. Gib mir mal Feuer. Ach Du rauchst ja nicht. Doch? Oh, ein Zippo, geil“. Bruno sackt schwer auf das Gartenbänkchen, eine Katze rollt gerade noch rechtzeitig unter das Tischlein und springt davon.

„Doch, aber ich muss sie mir erst noch drehen und richtig, ich bin Susannas Tante. Superscharf nehme ich mal als verunglücktes Kompliment, alles andere stimmt. Im übrigen nennt mich niemand Oma Raschke, aber das darfst Du natürlich, warum eigentlich?“

„Wegen dem Schild über dem Laden, ich dachte..“

„Wegen des Schildes. Oma Raschkes Blumen? Ha, da dachtest Du, Oma Raschke, das bin ich? Aber Du hast ja recht. Irgendwie bin ich

inzwischen wie Oma Raschke. Oma Raschke, eine echte Heißdüse, das war tatsächlich Susannas Oma. Ihre Mama, Irma, ist meine kleine Schwester, Halbschwester, war.. , konnte nicht.., unser Vater, ach das ist eine lange Geschichte, Bruno. Ich weiß nicht mal, ob der noch lebt“.

„Meine Mama konnte auch nicht. Ich bin dann ins Heim. Hermsdorf, Schwererziehbare, die ganze Packung“. Die Katze ist jetzt wieder da und will offensichtlich gekraut werden. So geht es weiter. Wenig später ist die SL auf der Bühne und Gudrun sieht tatsächlich ein bisschen aus wie Susanna, wenn man sich so ein Leben verdoppelt vorstellt und Bruno fragt sich, ob er dabeibleiben darf und ahnt nicht, dass alles genau so läuft, wie Gudrun sich das vorher ausgedacht hat, und Bruno erwischt sich, wie er gerade überlegt, wie das wäre, wenn man zusammen alt würde, mit Susanne natürlich.

„Natürlich, Bruno, aufwachen“.. Gudrun erklärt ihm, was sie vorhat. Es gibt für diese alten Baumuster ja keine Teile mehr zu kaufen. Selbst die unfreundlichen Typen aus der Honda-Vertretung am Kutschi bestellen alles nur noch über das Internet, wenn überhaupt. Meistens kommt unbrauchbarer Mist an. Gudrun hat da keine guten Erfahrungen gemacht. Die Zeiten der gut sortierten Ersatzteillager sind vorbei. Die Zeit der Schrauber ist vorbei. Wolfhart, ja, der ist ein anderes Kaliber, eine ganz andere Geschichte. Die Teile kommen nicht mehr von Honda oder Opel oder BMW, sondern von Amazon. Immer wenn sie eines der vielen Päckchen von einem der vielen Nachbarn entgegennimmt, gibt sie dem Jungen Trinkgeld. Zwei Euronen, auch drei. Das könnte gut als arrogant wirken, aber das nimmt Gudrun in Kauf. Sie selbst bestellt nix über das Netz, sie hat kein PayPal, keine E-Bank und nicht einmal eine Kreditkarte.

Wahrscheinlich ist sie heute der Oma Raschke näher, als sie selber glaubt. Und Zündkontakte für eine 72er Honda gibt es schon mal gar

nicht mehr. Daran besteht kein Zweifel. „Ich stelle die SL nach und nach auf Nirosta um. Die besorgt mir der Wolfhart. Anfangs hatte ich so meine Bedenken, wegen der galvanischen Kombination. Aber es geht. Bruno, könntest Du jetzt mal endlich den Deckel von der Lichtmaschine abschrauben?“. Der Bruno starrt die Gudrun an.

„Verstehe. Du weißt zwar, was eine Lichtmaschine ist, aber Du weißt nicht, wo der Deckel der Lichtmaschine ist. Stimmts?, Ok. Überhaupt, guck, mal. Der da kann es nicht sein. Das ist eindeutig die Kupplung, siehst Du das Kupplungsseil? Also bleibt nur, Tadaahaa, die linke Seite. Fünfer Imbus, Bruno. Ist die Kerze schon raus?“

Zündung einstellen. Zehn mal Hundert mal, Gudrun weiß es nicht. Der Bruno starrt nun diese wunderbare Gudrun noch immer an. Die macht sich jetzt ernsthafte Sorgen. Entweder fällt er gleich tot um, oder über mich her, denkt sie.

„Bruno. Bruno?“

„Meinst Du, ich bin schon zu alt?“

Oh Gott, denkt Gudrun, „Für mich?“

„Noch einmal neu anzufangen“ sagt Bruno. „Noch mal einen Beruf zu lernen. Meinen alten Beruf. Ich war Mechaniker. Also ich, ich war es nicht. Noch nicht. Bin rausgeflogen. Nach nich-ma-nem halben Jahr. Alles ging schief. Und alles ging falsch. Dann bin ich eingefahren. Mein Meister hat geweint. Er hat mich im Knast besucht. Mein Meister. Er hat geweint“.

„Als Du eingefahren bist“

„Nein, Mann, als er mich rausgeschmissen hat, der Bechstein. Immer wenn ich Mist gebaut habe, hat er mich geschüttelt. Geschüttelt. So sehr hat der mich gemocht.“

Ach Herrgott, so bizarr. Bruno hat die schwächliche Gudrun an den Schultern gepackt und schüttelt sie. Die Beschläge ihrer Latzhose klappern im Takt. Unsichtbar unter den schlohweißen Haaren. Als er das merkt, erschrickt er. Das wollte er nicht. Nein, so viel Nähe wollte er nicht. Aber sie kippt nur irgendwie gegen ihn und ihr weißes Haar kommt irgendwo an seinem rechten Schlüsselbein zu Ruhe. Irgendwie.

Gudrun dreht jetzt die Nirosta-Schrauben der Reihe nach aus dem Lichtmaschinendeckel. Legt diesen auf die Werkbank. Mit einem Lappen, der einfach plötzlich da ist, wischt sie zwei, drei Öltropfen ab, legt die Dichtung frei. Als der nächste Tropfen kommt, fängt sie ihn mit den Fingern auf, zwirbelt ihn, riecht daran und tritt unter das Licht um alles besser sehen zu können, schaut zufrieden, schiebt die Brille zurück auf die Stirn.

Der Lichtmaschinenrotor besitzt kleine bolzenrunde Intasien in einer interessanten Färbung; wahrscheinlich sind sie aus Messing. Mit einem Ringschlüssel lässt sich der Rotor nun langsam drehen. Man hört, wie der Zylinderinhalt durch das Loch der Zündkerze ganz nahe, aber auf der anderen, der Kupplungsseite des Motors, ausströmt. Eine Markierung auf der unteren Hälfte des Rotors kommt in Sicht und fährt an eine zweite Markierung, die sich am Gehäuse befindet.

„Wir schauen uns jetzt mal den Zündkontakt an“, sagt Gudrun und reicht ihm einen Imbus-Schlüssel. Wie selbstverständlich hat er die rechte Größe. Sie hatte sich eigentlich immer vorgenommen, den Deckel irgendwann verchromen zu lassen, aber jetzt, je älter sie wird, je älter er wird, findet sie die Patina auf dem zerkratzten Blechdeckelchen schön und angemessen. Und genau: hier passen auch keine Imbus-Schrauben hin. Gudrun weiß in welchem Schrank, in welcher Schublade, in welchem Schächtelchen sie suchen muss, um die Originalschrauben wiederzufinden.

Für Gudrun ist das jetzt Augenhöhe, der Bruno bückt sich etwas. Vor ihm, der Zündkontakt. Er befindet sich auf der linken Seite der

Nockenwelle. „Der Zündkontakt, da“, sagt Gudrun und tickert ihn mit dem Schraubenzieher an. Sie zieht ihn ab, grinst, schnappt ihn wieder rein, sagt, dass er erstaunlicherweise fast keinerlei Abbrand hätte und dass dies ein gutes Zeichen sei, Gudrun.

„Bei FIAT hatten wir so eine Strobo-Lampe. Aber der alte Bechstein hat mir gezeigt, wie es auch mit einem Eisenbahnlämpchen geht. Jeder hatte ein Eisenbahnlämpchen im Werkzeugkasten“.

„Fleischmann oder Märklin?“

„Fleischmann natürlich. Ich hatte Fleischmann.“ Nach kurzem Zögern, dann: „Ist gelogen. Ich hatte nie eine Eisenbahn. Und Du so?“ beeilt sich Bruno zu fragen; Schämt sich, nicht wegen DEM Lügen gerade, sondern weil er keine Modelleisenbahn hatte, als alle anderen, gefühlt die ganze Welt, eine Modelleisenbahn hatte, nur weil er arm war. Arm ist. Aber einen Werkzeugkasten hatte er. Na, ja anfangs.

„Fleischmann natürlich.“ Gudrun schaut zum Boden, kickt eine leere Schachtel in Richtung Mülleimer. „Mist, das wollte ich nicht. Wollte Dir nicht wehtun, Bruno“, Bruno, ein lieber, ein tragischer Knasti.

Der kramt jetzt in seiner Werkzeugkiste, ob er so ein Lämpchen sucht oder nicht, ist einfach nicht herauszubekommen. Und auch nicht so wichtig. Grundsätzlich ist Bruno ja durchaus ein Mann vom robusten Typ. Steckt was weg. Das weiß Gudrun. Und darauf kann sie sich auch irgendwie verlassen. Also, dass den Bruno nichts weghaut.

„Ich zeig Dir jetzt, wie es ohne Strobo und auch ohne Lämpchen geht“, sagt Gudrun und nestelt ein Zigarettenpapierchen aus der kleinen Schachtel in ihrem Tabakbeutel. Aber sie hat nicht vor, sich eine Zigarette zu drehen. Unter Brunos staunenden Blicken schnippt sie das Zigarettenpapierchen zwischen die Unterbrecherkontakte. Mit der rechten Hand dreht Gudrun nun den Lichtmaschinenrotor, mit der Linken behält sie das Papierchen zwischen ihren Fingern. Als es aus dem Kontakt flutscht, schaut sie auf den Lichtmaschinenrotor. Naja,

sagt sie, das würde so nicht reichen, sie gäbe der alten SL jetzt mal ein kleines Schlückchen Frühzündung! Genau das macht sie jetzt.

„Gib mir mal den Kreuzschlitz“. Bruno ist aus seiner Amphibienstarre erwacht. Er löst die beiden Schraubchen an der Platte des Zündkontakts, zieht sie ganz leicht an, schiebt den Schlitzschraubendreher – wo hat er den so schnell her – in die Nut, die irgendwie genau zu diesem Zweck dort angebracht zu sein scheint, hat schon das Papierchen eingeschnippt und während Gudrun an der Lichtmaschine dreht – ganz langsam – da rutscht das Zigarettenblättchen aus dem Zündkontakt. Perfekt.

„Perfetto, Bruno“. Er zieht die Schrauben fest. Später wird sie sich nicht daran erinnern können, ob sie ihn in diesem Moment umarmt oder das nur vorhatte. Jetzt aber sitzen sie erst einmal einträchtig auf dem Bänkchen im Hinterhof. Rauchen. Sprechen über Vergangenheit. Oma Raschke und Bruno. Weiß oder gelb oder blond. Und sprechen über Zukunft. Und wie sich herausstellt: Brunos Zukunft. Sowas ist neu für Bruno. Bisher lag das Gute immer nur in der Vergangenheit. Und war tot. „Ich kenne jemanden bei FIAT; der ist mir noch einen großen Gefallen schuldig. An der Oranienburger, Wittenau. Übrigens machen die auch ALFA. Du magst doch ALFAs, Bruno, oder?“. Der wischt sich jetzt irgendwas aus dem Auge und sagt: „Bevor Du was für Losers tust, muss ich Dich noch eine Frage fragen. Gudrun, warum geht der Kontakt eigentlich auf und nicht zu, damit es einen Zündfunken gibt. Ich weiß, das ist jetzt doof, aber ich habe das nie verstanden“.

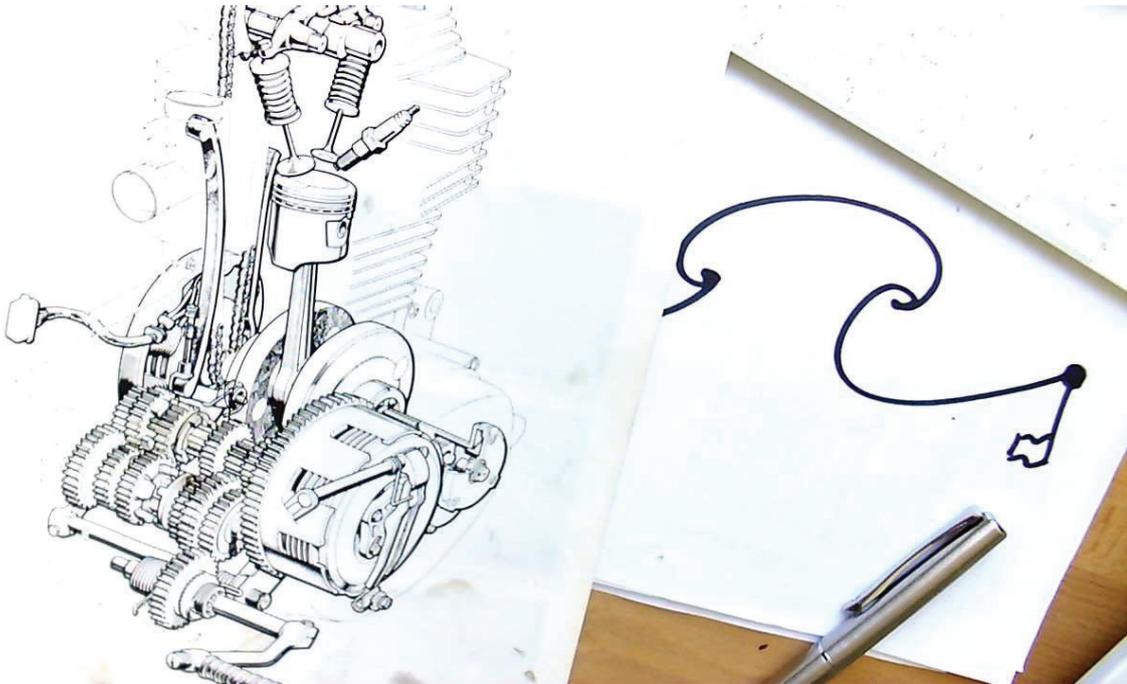


Abb. 17 Schreibtischbild

„Das ist auch gar nicht so einfach zu verstehen. Komm Bruno, wir lassen jetzt die SL knattern“; Gudrun legt sich das weiße Haar hinters Ohr, „ich glaube, das bist eigentlich ein Fall für den Snoopy, also für Wolfhard“, und das Haar, das Ohr, das Leuchten in Ihren Augen kommt ihm irgendwie .. Bruno verwirft diesen Gedanken. Good Run. Bruno ist .. Quatsch. Aber er weiß jetzt, wie Susanna als, na ja sagen wir mal, als ältere Frau, aussehen wird, also später dann. Auch das ist ihm .. komisch. Bis eben dachte er, keinen älteren Menschen zu kennen, der noch lebt, als Oma Raschke. Das ist natürlich übertrieben und jetzt auch ein bisschen viel für ihn. Er nimmt sich vor, demnächst mal über Frauen nachzudenken. So im Allgemeinen. RAAACKK. Die SCR reißt ihn aus seinen dunklen Gedanken. Ihr Sound ist betörend. Einhundert Kubikzentimeter. Eine Harley hat zwölfmal soviel. Auch das ist für Bruno so eine Schlüsselerfahrung. Es kommt überhaupt nicht auf den Hubraum an. Vollkommen egal. Ist diese SCR nicht einfach nur ein Wunderwerk? Eine mechanische Hymne? Eine Maschine hat

Charakter, oder eben nicht; genau das begreift Bruno in diesem Moment. Einhundert Kubikzentimeter, Kleiner als klein, aber: diese SL ist auf ihre Weise irgendwie, so erotisch? wie eigentlich auch, eigentlich. Er wischt den Gedanken weg. Und das ist auch gut so.

Wolfhard. Wie kann man nur so heißen, wenn man, ebenfalls eigentlich, ein ganz lieber Kerl ist, denkt Gudrun gerade, als sie den Bruno so anschaut. Verträumt. Von ganz außen betrachtet, so ein Quatsch, von außen betrachtet. Nie hatte sie jemals ergründet, wovon Wolfhart überhaupt schwärmen könnte. Von Snoopy vielleicht, jetzt mehr denn je; wo es mit ihm zu Ende geht. Er lebt in seiner eigenen Welt. „Was, um Gottes Willen, ist ein MUNGA?“, fragt Gudrun. Wolf, was ist ein Munga? Der Gedanke verfliegt. Woholf? Gudrun wischt den Gedanken weg. Auch: Gut so.

Der Bruno ist jetzt ganz wach. Lauscht dem Motor. Dreht am Gas. Einmal, ruck. Zweimal, ruck. Sie hängt sauber am Gas. EIN Sack rostiger Nägel prasselt herab, ganz der ... nein, Bruno. „Gutes MMädchen“, so mag sie die SL. Irgendwie wird die Luft jetzt dick. Blau. Gudrun dreht den Schlüssel rum. Der Zauber ist vorbei. Die SL ist stumm. Morgen, Gudrun, sie räuspert sich, morgen..., ja, gut, ok. Gut. Wirklich.

Induktion. Die Qualität des Energiegehalts und der Impulsmächtigkeit innerhalb eines Systems kann sich also insofern unterscheiden, dass wir die Erzeugendenwirkung bei einem Fluid die induzierte Geschwindigkeit, in einer Bilanz „verrechnen“ oder eben nicht. Rein mathematisch kommt es entweder zu einer Kompensation der Wirkungen der Induktion oder eben nicht; die dem System inhärente Energie bleibt konstant und könnte unter bestimmten Umständen erscheinen (it could! emerge). Oder eben nicht. Das klingt zunächst paradox. Um dieses Feldphänomen etwas zu beleuchten, betrachten wir ein elektrodynamisches Geschehen, das wir sofort verstehen und das vollständig erklärt ist.

Mancher Zeitgenosse, der noch kein umweltfreundliches Elektromobil fährt, sondern mit einem Auto, einem Motorrad oder gar einer liebenswerten Zwei-Takt-Velo-Solex mobil ist, besitzt vielleicht ein kleines Handbuch zum Fahrzeug, das die Wirkungsweise der Zündspule des Benzinmotors erklärt. Man erfährt ebendort:

Die Zündspule enthält einen Eisenkern und um diesen herum eine Hochspannungs- und eine Niederspannungswicklung.

Bei eingeschalteter Zündung und geschlossenem Unterbrecher erzeugt der durch die Niederspannungswicklung fließende Batteriestrom (12 Volt) ein kräftiges Magnetfeld. Dieses Magnetfeld bricht beim Öffnen der Unterbrecherkontakte zusammen, dadurch entsteht dann in der Hochspannungswicklung durch Induktionswirkung die Spannung für den Zündfunken. Diese Spannung ist umso größer, je stärker das Magnetfeld ist und je rascher es zusammenbricht. Ein zum Unterbrecher nebengeschalteter Kondensator dient zur Funkenlöschung und damit zum raschen Zusammenbruch des Magnetfelds²⁷.

Ein spulenförmiges Gebilde induziert also eine Induktionswirkung in einem Feld. Genau dann, wenn die (elektromagnetische) Induktionsursache erlischt, passiert etwas Neues. Vermittelt durch einen gemeinsamen Eisenkern wird in einem benachbartem Spulensystem eine elektrische Wirkung, die Zündspannung, messbar. Das zusammenbrechende elektrische Magnetfeld ist eine reiflich untersuchte physikalische Erscheinung, die wir unmittelbar verstehen. Auch ein elektrisches Wechselfeld bricht periodisch zusammen; mit der zweifachen Nennfrequenz. Wir nutzen dieses elektrodynamische Prinzip zur Transformation von Betriebsspannungen in jedem Computer-Netzteil. Aus Spaß könnten wir beide Wicklungen mit der gleichen Windungszahl aufbringen. Dann würden wir sofort verstehen,

²⁷ Martini, B. (1960) Kraftfahrer-Lehrbuch. 65. Auflage. R. C. Schmidt & Co Lehrmittel und Fachverlag Braunschweig-Berlin.

was geschieht; und hätten ein Maß für die Verluste. Die sind nämlich gering und der Prozess effizient. Und schnell. Die Prozesse in Benzinmotoren laufen auch dort mit hoher Eile ab und werden eher durch das thermodynamische Geschehen und nicht durch die Geschwindigkeit der elektrischen Induktionswirkungen der Zündspule limitiert. Eine Viertakt-Verbrennungskraftmaschine hat bei einer Drehzahl $n=6000$ U/min eine Arbeitsspielfrequenz von 50 Hz, die eines performanten Zweitaktmotors kann bei 200 Hz liegen. So gut.

Natürlich wird das Induktionsprinzip dem Bruno so auf die Schnelle nicht gewahr. Aber wir haben ja Zeit. Er weiß jetzt aber, dass – selbst wenn das Magnetfeld zusammenbricht, auf Grund welcher Physik auch immer – die Energie im Eisenkern vorhanden bleibt. Und auf jeden Fall hat das zusammenbrechende Magnetfeld mit Spulen zu tun. Die Spule ist ohnehin ein merkwürdiges Ding. Sie können so oder so sein. Einfach zu verstehen ist eine einfache Wicklung. Wie eine Angelschnur auf der Rolle. Das eine Ende ist innen, das andere außen. So erwarten wir das bei einer Klo-Rolle auch.

Jetzt aber schnappen wir uns irgendwas in der Mitte und wickeln ein „Doppel“ auf. Am Ende haben wir zwei Enden. Auch das ist eine Wicklung, eine Spirale. Im ersten Moment denken wir oh: da habe ich mir aber die Arbeit halbiert. Wie schön. Dann aber: wenn sich das abwickelt, macht es am Ende nur „fluppp“ und eine doppelt so lange Leine saust aus der Rolle. Das ergibt doch keinen Sinn?

Snoopy

Der Wolfhard ist ein komischer Kerl, denkt Bruno, als der dicke, alte Mann, der alte weiße Mann, auf einem ebenfalls sehr alten, sehr laut böllernden Etwas vor Brunos Waschstraße in einer benzischillernden Pfütze quietschend zum Halten kommt und winkt, als der Motor erstirbt. Nicht dem Bruno, den kennt er zwar vom Sehen, sondern der Gudrun, die ihn wohl hat anknattern hören und jetzt aus dem Blumenladen lugt.

Von Weitem betrachtet sieht man sofort, dass sich die beiden Männer recht gut verstehen werden, sie lachen und zeigen gegenseitig auf ihre Gefährte – Bruno hat sich ein E-Bike geliehen – das Wolfhard „unwürdig für einen erwachsenen Mann“ nennt und Bruno, der sich seine Pfote verbrennt, als er den winzigen Mofamotor nicht ganz aus Versehen anfasst, er wolle nur sehen, sagt Bruno, ob der auch wirklich echt sei, der sieht ja aus wie so ein Minimotor aus dem Spielzeugladen. „Ja“, seufzt Wolfhard, „die Velo ist ja auch mein Lieblingsspielzug.“

Die Beiden brechen nun auf, denn in Tegel wartet der Snoopy, der ist schon ein wenig gebrechlich und hat es an der Blase, da will man ihn nicht so lange zu Hause warten lassen.

Die Velo Solex geht gut. Bruno kommt fast nicht mit, so aufm Radweg. Der alte weiße Mann lebt alleine, das riecht man sofort, als Wolfhard die schwere Wohnungstür aufsperrt und ein erstaunlich agiler, dicker Beagel zwischen Brunos Beine hindurchschießt. „Ich hol nur schnell die Leine; musst Du auch noch mal aufs Klo?“ Neugierig linst Bruno in die kleine dunkle Wohnung hinein, die einzig aus Bücherregalen zu bestehen scheint. Regale, die nur ein winziges Rechteck zu einem kleinen Balkon freigeben. An der Decke schaukelt an dünnen Fäden ein Modellflugzeug im leichten Luftzug der offenen Balkontür, ein Doppeldecker. Zum Licht hin, eine überdimensionale Arbeitsplatte mit irgendwelchen technischen Zeichnungen und am Kopfende ein ziemlich neuer, bemerkt Bruno, Laptop, staunt Bruno. „Bruno! Zieh

einfach nur die Tür zu“, poltert es jetzt von der Treppe hoch. Bald sitzen sie am Tegeler See auf einer Bank, Snoopy malträtiert sein Gummihuhn. „Heute ist ja die Champagner-Regatta“, sagt Wofhard, „das da drüben ist nicht das andere Ufer, sondern die Insel Hasselwerder“. Immer mehr weiße Dreiecke erscheinen nun vor der Kulisse der Villa Borsig, auf der eine Deutschlandfahne flattert. „Die fahren jetzt rein in die Malche und da wo geschmückt ist, feiern sie dann, die Franzosen“. Mit Champagner, rät Bruno und lacht, nein nur mit Rotwein, lacht Wolfhard, die sind ja arm. Na, ja oder nicht reich, halt. Gudrun sagt, du möchtest was über Zündspulen wissen?“ wechselt Wolfhard das Thema, „das ist doch total langweilig, Bruno, ich erzähle Dir eine andere Geschichte. Höflich nickt der Bruno sein schüchternes Nicken.

„Du kennst doch den Snoopy, also den echten, von den Peanuts?“ Ach, Gott, denkt Bruno, also doch nicht der Mechanikergott, sondern ein infantiler alter, weißer Mann. „Ja, ja, natürlich kenn ich den. Und Charly Braun. Und Dein Hund heißt ja auch so und wo ist der überhaupt?“ versucht sich der Bruno zu retten.

„Der Snoopy flog eine Sowith Camel. Also, er dachte zumindest, dass seine Hundehütte ein Doppeldecker, um genau zu sein, eine Sopwith F1 Camel, sei. Und ziemlich häufig kämpfte er gegen den Roten Baron. Und ziemlich oft wurde seine Hundehütte förmlich zersiebt vom Maschinengewehrfeuer des Roten Baron. Der war Deutscher und hatte einen roten Dreidecker, die Focker DR1 und war der beste Flieger der Welt, aber er hatte nicht mit Snoopy gerechnet und seiner Sopwith Camel. Hirn gegen Herz, Blut gegen Benzin, drei gegen zwei. F1 gegen DR1. Sein oder Nichtsein. Man ahnt überhaupt nicht, glaubt nicht, was ein mutiger Beagel aushält, wenn es um Leben und Tod geht“.

Der alte Mann schnappt nach Luft und Bruno legt ihm beruhigend die Hand auf den Arm. „Wir können hier einfach auch nur so sitzen und uns die Segelboote ansehen. Die Geschichte von der Sopwith Camel

erzählst Du mir vielleicht ein andermal. Auf Deinem Balkon und ich bring uns Bier mit“.

Ja, sagt der, das sei wohl auch besser so, schnauft er. Als sie wieder in der Gorkistraße ankommen, sind Hund und Wolfhard sichtlich erschöpft und der Bruno hat so eine dunkle Vorahnung, die sich keine drei Wochen später erfüllt.

Links Susanna, rechts Gudrun im Arm wanken sie sichtlich benommen durch das kleine Friedhofstor, sie waren die vier Einzigen am frischen Grab. „Du warst bei ihm?“, fragt Bruno an Gudrun gewandt, die nickt nur ein unmerkliches, rotznasses Zucken. „Komm jetzt Snoopy. Die zwei Tage, bevor er dann aufgab, haben wir unser Leben noch einmal durchgesprochen“. Bruno bleibt stehen. „Du meinst, Du und der Wolfhard, ihr..?“ „Ja“, nickt Gudrun, „Ich kann nicht sagen, dass wir es nicht versucht hätten. Mit einer wie mir kann einer wie der, ach Bruno, das ist doch alles eine Megascheiße, jetzt ist es mal vierzig Jahre zu spät. Und er lässt mich aus reiner Rache auch noch auf fünftausend Büchern sitzen. Und einem Hund. Aber am Ende sprach er von Susanna und von Dir, Bruno. Und dass er Dich mag. Und sogar sehr mag. Beinahe so sehr wie die Susanna. Seine geliebte Sanna. Und ich soll Dir was geben, nachher und Du sollst auch was lesen, was, was er selbst geschrieben hat und Du musst sie ja gut behandeln“.

Ja klar, schluckt der Bruno und drückt die Susanna ganz fest an sich ran. „Die VELO SOLEX, natürlich“, sagt Gudrun „so war er, der Wolfhard. Und nicht zu gebrauchen,“ und alle drei lachen. Und weinen.

Und die Trauer nimmt kein Ende. Snoopy verschwindet einfach. Es ist der Donnerstag, eine Woche nach der Beerdigung, als die Polizeiwache Tegel bei Gudrun anruft, sie hätten hier einen leblosen Hund auf dem Friedhof. Verhungert. Mit ihrer Adresse im Halsband.

Ein Blumenladen in der Seestraße, Berlin Wedding. Besonders für Bruno ist das alles kaum zu verstehen. Susanna hält eine seltsam verklebte Schachtel in den Händen, Gudrun gibt Bruno einen postbraunen Umschlag; drinnen ist an vielleicht zehn Seiten Schreibmaschinentext auf kariertem Ringbuchpapier eine Art Deckblatt angetackert, darauf mit krakeliger Schrift steht:

Alles über Zündspulen.

Natürlich fliegt der Knoller keine Camel, sondern eine Albatros. Alles andere stimmt. Lieber Bruno, lass uns demnächst wieder Segelboote angucken,

Dein Wolfhard

Knoller-Betz-Effekt

Richard Knoller studiert an der Technischen Hochschule in Wien und schließt sein Maschinenbaustudium 1893 mit Auszeichnung ab. Er arbeitet in unterschiedlichen Maschinenfabriken auch außerhalb Österreichs und widmet sich dem Automobilbau. Mit L. Goebel gründet er eine Fahrzeugfabrik. Schon während seiner Zeit als Ingenieur beginnt er mit theoretischen Arbeiten und ersten Publikationen. Im Jahr 1899 ist er der offizielle Repräsentant Österreichs beim International Commercial Congress in Philadelphia. Ein Jahr später erhält er bei der Pariser Weltausstellung für eine Ventilsteuerung für Verbrennungskraftmaschinen die Goldmedaille. Ferner entwickelt er einen Dampfwagen mit einer Vierradbremse, welche mit einer Ausgleichseinrichtung gleichmäßig auf alle Räder wirkt. Seine wissenschaftliche Arbeit beginnt er als Assistent an der TU Wien 1895. Knoller beschäftigt sich zu dieser Zeit auch mit der in Österreich

Wirbel, Flossen und Kamele

aufkommenden Flugzeugtechnik. Es entstehen Schriften über den Strömungswiderstand von Flugzeugtragflächen und zur Flugstabilität.

Ab 1909 ist er außerordentlicher Professor am neu errichteten Lehrstuhl für Luftschiffahrt und Automobilwesen der TU Wien. Er baut einen Windkanal nach Göttinger Bauweise aber mit senkrechter Luftführung. Sämtliche Einrichtungen und Geräte des Kanals werden von Knoller selbst entworfen. In den Kriegsjahren arbeitet er als Flugzeugkonstrukteur und kümmert sich zunächst um die Weiterentwicklung deutscher Baumuster. Die Tragflügel der Flugzeuge nach Knollers Bauart sind technisch dem Entwicklungsstand ihrer Zeit weit voraus, denn sie sind so konstruiert, dass sie ohne Querverspannung auskommen. Es ist genau dieses Strebenwerk zwischen den Tragflügeln, das den enorm hohen Strömungswiderstand der Doppeldeckerkonfiguration bedingt.

Die unverstrebte Mehrdeckertragfläche funktioniert strukturmechanisch, jedoch bekommt die von Knoller umgebaute Albatros BI keine technische Zulassung, weil man aus „theoretischer Sicht“ um die mechanische Stabilität der Knoller'schen Konstruktion fürchtet.

Die ursprüngliche Albatros soll später bei der Ausentwicklung des Focker Dreideckers eine tragende Rolle spielen. Aber das weiß Knoller zu diesem Zeitpunkte noch nicht. Wie schade, dass die Knoller'schen Konzepte wenig Gehör finden.

Nach dem Ersten Weltkrieg musste der Windkanal zerstört werden. 1919 wird Knoller ordentlicher Professor an der TU Wien und wendet sich wieder der Lehrtätigkeit an der Universität und der Weiterentwicklung aerodynamischer Theorien zu. Seine bedeutendste Untersuchung ist die theoretische Erklärung des so genannten „**negativen Widerstandes**“ von Tragflächen.

Wirbel, Flossen und Kamele

Knoller, später auch Betz in Göttingen, weisen in ihren Veröffentlichungen darauf hin, dass man sich den scheinbar mühelosen Segelflug der Vögel ohne Aufwind, durch eine permanent wechselnde Anströmrichtung der beaufschlagenden Luft am Flügel erklären könne [W-1][Bet-12][Knol-09][Knol-13]. Die theoretischen Arbeiten zum "negativen Widerstand" liegen schon ein paar Jahre zurück, als Knoller den Wiener Windkanal in Betrieb nimmt, der im Gegensatz zu den waagrecht angeordneten Windkanälen in Göttingen und jenem der Forschungsanstalt Prof. Junkers in Dessau von senkrechter Bauart ist.

Experimentell nachgewiesen wird der Effekt des "**negativen Widerstands**", der vor allem für das Flugwesen, insbesondere das Segelfliegen bedeutsam erscheint, durch den Nachfolger Knollers am Lehrstuhl für Luftschiffahrt und Automobilwesen an der TU Wien, dem Labortechniker Richard Katzmayr. Was ist nun der Kern des Knoller-Betz-Effekts, oder wie er später heißen wird: **Katzmayr-Effekt**?

Ein aeromechanisch wirksamer Tragflügel sei in Bewegung. Im körperfesten Koordinatensystem, der lagrange'schen Sichtweise, die Knoller nicht als solche kennt, sondern nur als Flieger, stellt sich der stationäre Betrieb des Flugsystems als ein (horizontal, vertikal und axialer) Zustand dar, in dem weder Roll-, Gier- oder Kippbewegungen auftauchen und Gravitation, Auftrieb, Widerstand und antreibende Kraft gerade ein Gleichgewicht bilden. Nun soll, ohne dass zunächst nach den Ursachen gefragt wird, die Anströmrichtung um einen kleinen Betrag variieren. In einem raumfesten Koordinatensystem, der euler'schen Sichtweise!, also wenn man den Flug vom Boden aus betrachtet, erhält das bislang im Gleichgewicht befindliche Kräftesystem eine in Richtung der Vorwärtsbewegung liegende (axiale) Komponente, die 1. entlang der Wirklinie der Widerstandskomponente auftritt, 2. als Schub

Wirbel, Flossen und Kamele

verstanden werden kann und damit 3. das Gesamtflugsystem vorantreibt.

Für die Experimente, die der Mitarbeiter Knollers und spätere Nachfolger, Richard Katzmayr durchführte, wird der Windkanal aufwändig umgerüstet. Bewegliche Ableitbleche in der Art einer Jalousie sorgen nun dafür, dass die aus dem Windtunnel austretende Strömung "abgelenkt" dem Messbereich, in dem sich ein Tragflügelsegment befindet, zugeführt werden kann.

Der Tragflügel liefert tatsächlich? den vorausgesagten Vortrieb und damit die Bestätigung der theoretischen Voraussagen von Knoller und Betz.

Katzmayr veröffentlicht seine Messergebnisse [Katz-22]. Er schreibt in einem Fortschrittsbericht des National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Massachusetts Institute of Technology.

In der englischsprachigen Welt, so etwa am Massachusetts Institute of Technology (MIT) und dem National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) wird in den frühen Jahren des 20ten Jahrhunderts die Forschung an den Laboratorien in Europa mit größter Aufmerksamkeit verfolgt. Eigene Experimente und theoretische Untersuchungen zum Katzmayr-Effekt werden bei der NACA durchgeführt.

In einer unmittelbar auf die Veröffentlichung Katzmayr's angestoßenen Studie werden Evaluationsuntersuchungen für theoretisch ideale Strömung durchgeführt [Ober-25]. Shatswall Ober vom National Advisory Committee for Aeronautics kommt zu dem (vorsichtigen) Schluss, dass eine gewisse Unsicherheit im Wiener Messaufbau nicht auszuschließen sei, aber das von Katzmayr deklarierte Phänomen nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, insbesondere wenn dynamische Effekte in die Betrachtung eingeschlossen werden.

Wirbel, Flossen und Kamele

Shatswall Ober vom National Advisory Committee for Aeronautics nimmt den (wie ich ihn mir vorstelle) kleinen, frechen Katzmayr nicht auseinander, zerlegt ihn nicht in seine Einzelteile sondern handelt wissenschaftlich. Er spricht von „Messungenauigkeit“. Ein amerikanischer Gentleman. Aber ich meine wohl zwischen den Zeilen zu lesen, dass Ober dem Österreicher nicht so ganz traut. Immerhin haben nicht nur Deutschland, sondern auch die Ösis kurz zuvor einen Krieg verloren. In den USA bleibt man vorsichtig. Grundsätzlich sind wir das heute ja auch.

Aber nicht jetzt. Ich stelle mir vor: Knoller, das Vorbild, der große Chef, den es bald zu beerben gilt. Erfolgreich im Business, sattelfest in der Theorie. Schreibt und schreibt. Redet und redet. Forscht und forscht. Für den kleinen frechen Katzmayr ist er ein Gott. Und natürlich will ein braver Katzmayr jetzt alles richtig machen. Er baut den Windkanal um. Lässt den Flügel wackeln, führt seine Messungen durch, im Rahmen seiner technischen Möglichkeiten; das vielleicht sogar irgendwie recht genau, aber.. Knollers Albatros B.I. war ein Doppeldecker! Und Katzmayrs Flügel ist nur eine Scheibe. A Wing-Section! Und: Knoller war Flieger; flog seinen Doppeldecker. Hier im Cockpit, hier im lagrang'schen System reift die Frage, die Forschungsfrage des so genannten „negativen Widerstandes“ von Tragflächen. Eines Doppeldeckers. Für Knoller besteht die Flugzeugwelt jener Tage, der praktische Erfahrungshorizont nur aus Doppeldeckern. Das gilt auch für die Theorie; zur gleichen Zeit rechnen in Göttingen der Prandtl und der Munk (der Munk? nicht zufällig finden wir den Munk in der Diskussion um die legendäre Pitts Special²⁸ wieder) den endlichen Flügel, den endlichen Doppeldecker!

²⁸ Die Pitts Special ist ein Kunstflugdoppeldecker, der von Curtis Pitts (1915–2005) entwickelt wurde. Die Konstruktion ist in traditioneller Gemischtbauweise ausgeführt, d. h. ein geschweißter Stahlrohrumpf und Tragflächen aus Holz. Die ersten Entwurfsarbeiten an der Ur-Version begannen bereits 1942. Der Erstflug fand 1945 statt, mit einem Motor, der gerade einmal 55 hp (ca. 56 PS) hatte. Das Leergewicht betrug etwa 227 kg.

Wirbel, Flossen und Kamele

Als Katzmayr Jahre später den Effekt im Windkanal nachstellt, hat sich die Situation aber schon wesentlich verändert. Vielleicht hat er die Unterschiede zwischen Eindecker, Mehrdecker und seinem Windkanal-Versuchsaufbau mit einem Tragflügelsegment nicht gesehen, nicht sehen wollen oder die Nicht-Zusammenhänge schier unterschätzt?

In Göttingen zur gleichen Zeit scheint man den Braten jedoch zu riechen. Prandtl beispielsweise zeigt, dass sich die Tragflächen in Doppeldeckerkonfiguration gegenseitig beeinflussen. Er weiß aus Experimenten, dass die äußere Tragfläche - also im Normalflugbild oben - früher ablöst. Auch wird die Potentialtheorie weiter und weiter verfeinert. Prandtl hat sich intensiv mit der Berechnung, ja mit der Simulation der rezenten Flugzeuge, also auch mit Doppeldeckern, beschäftigt; beispielsweise das Traglinienverfahren auf Doppeldecker angewendet. Das Traglinienverfahren ist zunächst eine Theorie für den unendlich lang ausgedehnten Tragflügel. Zwar liefert Prandtl später noch eine Erklärung des Randwirbels und seine Theorie der „Wing-Sections“²⁹ bleibt hundert Jahre lang Lehrstoff in den Luftfahrtinstituten [Abbo-59].

Im Wiener Windkanal dann misst Katzmayr ebenfalls den „unendlichen“ Flügel. Das ist damals durchaus Stand der Wissenschaft. Mit den Mitteln der stationären Strömungsanalyse, zumal einer potentialtheoretischen Betrachtung bleibt der Katzmayr-Effekt aber undarstellbar. Transiente Berechnungen oder experimentelle Untersuchungen an und in nichtstationären Messstrecken [Hans-07] könnten (heute vielleicht) die entscheidenden Effekte darstellen. Gleichzeitig wissen wir, dass Geschwindigkeitsgradienten der Strömung, die nicht absolut exakt auf der Achse der Hauptbewegungsrichtung eines Flugsystems oder nicht

²⁹ Ira H. Abbott, Albert E. von Doenhoff; (1959) Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data. Dover Publications, New York

Wirbel, Flossen und Kamele

exakt auf der horizontalen Achse (kartesische Koordinaten) des Polarendiagramms eines Tragflügelsektors (Profil mit Auftriebsbeiwert $C_a=0!$) liegen, so genannte Inversionen und Geschwindigkeitsänderungen in einer Scherschicht sind, die als Richtungsänderung der Strömung wahrnehmbar sind und sehr energiereich sein können. Dies hat spürbare Wirkungen auf das Auftriebs- und Widerstandsgebaren der Strömungssysteme.

Als Katzmayr den vermeintlich „**Widerstand mindernden Effekt**“ im Windkanal nachstellt, richten sich seine Hoffnungen auf die Verbesserung des Stands der Technik. Auch das ist aus heutiger Sicht legitim. Wir würden das, also ich würde das ja auch so tun. Seine Windkanalversuche beziehen sich auf avisierte Zukunftstechnik und die gehört Anfang der zwanziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts nun mal nicht den Mehrdeckersystemen, sondern den einflügligen Tief-, Mittel-, und Hochdeckern.

Was hätte er wohl mit einem Messaufbau gemessen, der sich einen strikten wissenschaftlichen Weg beugt, der das nachstellt, was Knoller in seinem Flugzeug erlebt, gespürt hat. Was wäre geschehen, wenn Katzmayr mit seinem Chef Knoller gesprochen, ihm zugehört, ihn beim Wort genommen hätte? Und was hätte es genützt, damals. Vielleicht wäre die keinen Falls friedliche Geschichte der Kriegswaffe Flugzeug anders geschrieben worden. Dem (nutzlosen) Postulat Katzmayrs folgten nun eine ziemlich genau hundert Jahre währende explosionsartige Entwicklung der Luftfahrt. Der schreckliche Krieg in der Mitte dieses zwanzigsten Jahrhunderts förderte eine Vielzahl, als genial zu bezeichnende technische Innovationen an die Oberfläche der Konstruktionsbüros, an die Grenze des physikalisch Machbaren und in das Blickfeld der mehr oder weniger der Schönheit der Waffen erlegenen Konstrukteure und Anwender.

Wirbel, Flossen und Kamele

Und dennoch hat sich die Situation nicht wesentlich verändert. Vielleicht ist der Doppeldecker heute zu nichts nütze. Zu nichts, was wir uns vorstellen können, denn Tragflügelssysteme in Doppeldeckerkonfiguration stehen auch heute nicht oben in den Forschungsagenden der Namhaften und es bleiben selbst im Laborbetrieb relativ einfach darstellbare, auf der Wechselwirkung von Wirbeln basierende Strömungsphänomene, die Wirbelspulenphysik, unbeachtet.

Katzmayr konnte es nicht wissen. Prandtl war nahe dran. Und Biot und Savart³⁰ wußten immer schon um die Universalität des Elektrodynamischen Prinzips und dass die allgemeine Feldtheorie auch auf Potentialströmungen anzuwenden ist. Dennoch ist sie aus unserer heutigen immer noch bescheidenen Sicht nur eine zukünftige Option; im Flugwesen und vielleicht auch in der maritimen Technik. Ich möchte an dieser Stelle keine „Phänomenologie der Fluidmechanischen Wirbelspule“³¹ entwickeln; die ist ja Stand der Wissenschaft.

Und jetzt kommt auch endlich der kleine freche Richard Katzmayr wieder ins Spiel. Katzmayrs Chef, der Knoller, der Flieger, fliegt mit einer **Albatros**³², dem Doppeldecker, rum. So zum Spaß. Die Luft über Wien ist rau, es ist ein böiger Tag. Gerade in

³⁰ Das Biot-Savart-Gesetz beschreibt das Magnetfeld bewegter Ladungen. Es stellt einen Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke H und der elektrischen Stromdichte J her und erlaubt die Berechnung räumlicher magnetischer Feldstärkenverteilungen anhand der Kenntnis der räumlichen Stromverteilungen. Hier wird das Gesetz als Beziehung zwischen der magnetischen Flussdichte B und der elektrischen Stromdichte J behandelt. <https://de.wikipedia.org/wiki/Biot-Savart-Gesetz>

³¹ Dienst, Mi. (2018) Zur stationären strömungsmechanischen Wirbelspule, Fluidmechanische [Phänomenologie der Dreideckerkonfiguration](#), GRIN-Verlag GmbH München, ISBN(Buch): 9783668705135

³² Nützliche Einzelheiten aus http://www.bredow-web.de/ILA_2002/Oldtimer/Albatros_B1/albatros_b1.html Der Albatros B I (ÖDD) war ein unbewaffneter zweisitziger Doppeldecker-Aufklärer aus den deutschen Albatros-Werken in Berlin, Johannisthal. Zunächst wurden 29 Stück importiert (21.01-21.29), dann weitere (23.01-23.31) mit 145 PS Hiero bei den österreichisch-ungarischen Albatros-Werken in Wien, Stadlau gebaut. Das Musterflugzeug 20.01 ist heute im Heeresgeschichtlichen Museum Wien ausgestellt. Es kam am 1. Okt. 1914 nach Österreich. Prof. Richard Knoller entwickelte zum Aufklärer Albatros B I eine gepfeilte Tragfläche (KNV).

Wirbel, Flossen und Kamele

Bodennähe wird die gute Albatros B1 mächtig durchgerüttelt. Eigentlich ist es gar keine Albatros. Knoller hat sie umbauen lassen. Die B1 hat nun keine Streben mehr zwischen den beiden Flügeln. Jedes Spannschloss schmeißt er eigenhändig in einen Zigarrenkarton, am Ende sind es 74 Stück. Die Spannseile lässt er vor der Halle aufreihen; über einhundert Meter Widerstand: „**Ihr ärgert's mich nicht**“. Die Tragflächen ließ Knoller negativ pfeilen, eine Sensation, und vergrößern, was den Katzmayer nur immer wieder den Kopf schütteln lässt. Er will einfach nicht verstehen, dass etwas **weniger** biegt, wenn der Hebelarm größer wird. Im Original macht die Albatros mit ihrem 165PS starken Walter Minor Sechszylinder maximal 120 km/h. Aber die Wiener B1 fliegt selbst mit einem 145 PS Hiero (24.51-24.66) deutlich schneller. Und Knoller weiß, dass er sich auf „seine B1“ verlassen kann. An die elastischen Flügel muss man sich halt erst einmal gewöhnen, sagt er sich, aber die geringere Flächenbelastung der vergrößerten Tragfläche entschärft die dynamische Biegelast.

Er weiß, dass die Zukunft dem unverstrebten Tragflügel gehört; aber was er irgendwie auch ahnt ist, dass es wohl keine Doppeldeckertragflügel sein wird, der das große Rennen macht.

Das alles befürchtet oder weiß der ehrwürdige Professor. Was Knoller definitiv nicht weiß, ja einfach auch nicht wissen kann ist, dass gerade jetzt, in diesem Augenblick und an diesem ruppigen Tag, das Doppeldecker-Flügeltragwerk der B1 links und rechts zwei riesige Wirbelspulen in den fluidischen Strömungsnachlauf schneidet; zwei zweigängige, gegenläufige Wirbelwendel die den eindrucksvollen Durchmesser einer Wiener Litfaßsäule aufweisen und bei 30 Meter Strömung pro Sekunde erstaunlich stabil sind. Wie eine riesige unsichtbare Walze formt sich hinter dem Doppeldecker-Flügeltragwerk ein mantelförmiger Wirbelschlauch aus. Linkks und rechts.

Wirbel, Flossen und Kamele

Leider sind sie mit den Augen des Piloten nicht zu sehen. Ein jeder Flieger weiß und Knoller, der die Theorie so liebt, insbesondere weiß: jede Richtungsänderung der Strömung stellt sich am Tragflügel als eine Geschwindigkeitsänderung dar. Die Böen über Wien haben jetzt eine brutale Gewalt und prügeln auf die beiden Tragflügel Knollers Albatros ein. Von links, von rechts. Von vorn. Zing. Zong. Flash.

Da ist er plötzlich: der „negative Widerstand“. Und nochmal und nochmal. Es ist, als ob die Tragfläche „pulst“, als würde ein Dämon die Albatros nach vorne pumpen. Blitze zerreißen den Himmel über Wien, schwefelgrün breitet sich die Druckwelle des Donners über den Horizont ...

Schon lange hat er Anderen keinen so langen Text mehr vorgelesen. Es scheint auch irgendwie das Ende der Geschichte zu fehlen.

„Bruno, möchtest Du nicht vielleicht auch dieses schreckliche Modellflug-Ding übernehmen?“ schnieft Gudrun.

„Das ist kein Ding. Das ist eine Sopwich. Eine Sopwich F1 Camel, um genau zu sein“, doziert Bruno.

Gudrun: „Der Wolfhard ist schon irgendwie speziell. Also war. Hast Du, Susanna, irgendwas von dem verstanden, was der Wolfhard da geschrieben hat?“ Die schaut Gudrun fassungslos an: „ja, natürlich, alles!“

Im Blumenladen wird es jetzt still. Gudrun geht zu dem kleinen Wandschrank, ganz hinten. Öffnet ihn. Klappt eine Flasche Jägermeister nach vorn. „Das hätte ich jetzt nicht auf der Schiene gehabt. Hol mal drei Tassen von hinten, Sanne“.

Berlin Wedding, Seestraße.

Ja, ok. Natürlich ist die Szene über Wien nur erfunden, aber malen wir uns einfach noch einmal weiter aus, was wohl passiert sein könnte, an diesem böigen Tag; skizzieren wir: Das Fluggerät produziert Vortrieb durch die nicht ganz so potente 145 PS Hiero Maschine und ordentlich Auftrieb über das Zweiflügelssystem. Auch mit großen Anstellwinkeln und über weite Strecken in dieser Fluglage, reißt der Albatros die Strömung nicht ab; das mag der große Vorteil eines Doppeldeckers sein. Knoller hat Sturm. Der Wind brettet nun heftig in alles was sich zu fliegen traut, über Wien. Die Böen kommen von keiner bevorzugten Seite, ihre Anströmrichtung variiert und hat spürbar vertikale Komponenten. Die Verhältnisse werden zunehmend instationär.

Also beobachten wir weiter, was passiert. Die Albatros legt sich in eine weite, elegante Kurve. Die Maschine arbeitet im Teillastbereich. An jedem Tragflügelende – es sind ja vier - bildet sich ein mächtiger Randwirbel aus. Das ist jetzt keine Metapher der Rede, sondern an einem wohldimensionierten Flügel mit einem recht dicken Tragflügelprofil (Munk?) besitzen wir eine „sichere“ Auftriebskomponente, für die wir aber einen hohen Preis zahlen. Der im – vom Auftrieb induzierten Randwirbel steckende Widerstand - wir werden ihn weiter unten noch einmal aufschreiben, aber wir wissen heute, es sollte größer sein als 60%-70% des Gesamtwiderstands durch das Auftriebsgebaren der Tragfläche sein, ist dieser Preis.

An jedem Tragflügelende also ein ähnliches Bild: eine intensive, stromabwärts abfließende Wirbelfadenstruktur. Na ja, „fette“ Wirbelfäden, eher Wirbelwürste. Von diesen „kohärenten“ Wirbelstrukturen sehen wir also vier; je zwei Pärchen backbord und zwei steuerbord. Durch die Bauart des Doppeldeckers bedingt besitzen die Wirbelfäden eine Zirkulation in die gleiche Richtung. Steuerbords, physikalisch positiv rechtsschraubend, backbords links herum. Für das, was jetzt energetisch geschieht, haben wir zum gegenwärtigen Zeitpunkt der Rede noch kein quantifizierendes Modell, abgesehen

von der Formel von Prandtl, die uns einen auftriebsbedingten induzierten Widerstand prognostiziert:

$$\text{Induzierter Widerstand: } c_i = c_a^2 / \pi \lambda \quad [\text{N}]$$

mit: c_a : Liftbeiwert, Tiefe t und Länge b und $A=b t$, Streckung $\lambda=b/t$ eines Rechtecktragflügels, Γ Zirkulation, v_∞ der (Anström-) Geschwindigkeit und ρ Dichte des Mediums.

$$\begin{aligned} \text{Auftrieb, Lift} \quad F_L &= c_a \rho A/2 v^2 = \Gamma \rho v b \quad [\text{N}] \\ \text{Friktion:} \quad F_R &= c_W \rho A/2 v^2 \end{aligned}$$

Die Friktion beinhaltet Form- und Reibungswiderstand und macht etwa 1/3 des Gesamtwiderstands aus. Induzierter Widerstand und Auftrieb Lift werden über den Auftriebsbeiwert motiviert, der im Falle des Tragflügelprofils MUNK³³ bei maximal $c_{a,\text{max}} = 1.6$.

Betrachten wir das, worüber wir zu „spekulieren“ in der Lage sind: die intensive, stromabwärts abfließende Wirbelfadenstruktur!

- (1) Jede kohärente Wirbelfaden-Struktur besitzt die Potenz, ihre fluidische Umgebung „zu organisieren“ (Helmholtz).
- (2) Der Wirbelfaden „induziert“ Geschwindigkeit in sein fluidisches Umfeld (Biot und Savart).
- (3) Mit der physikalischen Kausalität über Geschwindigkeit und Druckgradient (Bernoulli) in diesem nunmehr „aufgeladenem“ Feld

³³ Zu Ehren: Max Michael Munk (* 22. Oktober 1890 in Hamburg^[1]; † 1986) war ein deutsch-amerikanischer Aeronautiker.^[2] Seine dissertation wurde bekannt als Prandtls Strömungsprofil-Theorie und erklärte so fundamentale Phänomene wie den Induzierten Luftwiderstand.

[Hinweis des Autors] Es handelt sich beim Profil NACA M6³ (Munk6) um ein klassisches, nichtsymmetrisches S-Schlagprofil, welches identisch ist mit dem Profil GOE 677. G, das einen soliden Auftriebsbeiwert von $CL= 1,6$ bei einem Stallwinkel von $\alpha_{ST} = 16^\circ$ sofern die Anströmgeschwindigkeiten⁴ nicht allzu hoch sind.

wäre dem Fluid nun die Fähigkeit inhärent, andere fluidische Objekte zu „verschieben“. Und genau das tut der Wirbelfaden mit einem benachbarten Wirbelfaden.

(4) Da die beiden Wirbelfäden das gleiche innere Milieu, die gleiche Zirkulationsrichtung aufweisen, passiert etwas sehr Elegantes. Die Wirbelfäden beginnen, angeregt durch die in ihrem mittelbaren Umfeld vorhandenen Geschwindigkeits- respektive Druck- Gradienten, miteinander zu tanzen. Sie „zwirbeln“ im Nachlauf des Doppeldecker-Tragflächensystems ein spulenförmiges System aus (zwei nahezu gleichen) Wirbelfäden auf.

(5) Fluidmechanische Wirbelspulen sind sehr leistungsfähig und erstaunlich stabil. In ihrem Kern treten jetzt „induzierte“ Geschwindigkeiten auf, die doppelt oder dreimal so hoch sein können, wie die „anfachende“ Anströmgeschwindigkeit v_∞ des Tragflügel systems.

Die die Anströmgeschwindigkeit v_∞ der hier betrachteten österreichischen Albatros beträgt unter Vollast maximal 130 km/h, also etwa 35 m/s und für eine Auftrieb generierenden Tragfläche unserer Zeit nicht allzu groß ist. Wichtig in diesem Zusammenhang ist aber ein ganz anderer Aspekt, über den wir an dieser Stelle ebenfalls nur spekulieren wollen, nämlich die Effizienz der Geschwindigkeits-Induktion oder greifen wir den durchaus heiklen Begriff ruhig schon einmal auf: der „Impulswirksamkeit“ des kohärenten Wirbelfadensystems. Wir könnten nun die durch die mit der induzierten Geschwindigkeit v_i durch das Spulensystem „gepumpte“ Luftmasse, den Fluidmassenstrom $\rho(dV/dt)$ ermitteln, da wir ja die Dichte des Mediums und außerdem den (maximal möglichen) Durchmesser des Wirbelmantels kennen.

Wir kämen zu dem (a) erstaunlichen Ergebnis, dass wir hier einen „JET-Stream“ hoher Güte produzieren, der (b) uns einen gewissen Anteil der zum Auftrieb des Systems aufgewandten Energie sogar zurückgibt, der aber gleichzeitig (c) von seiner energetischen Potenz weit hinter dem

theoretisch möglichen zurückbleibt. Der Grund für diesen schlechten „Transformations-Wirkungsgrad“ ist (natürlich), dass sich in einem konzentrischen Spulensystem und der pfadabhängigen Induktion in das Feld Impulswirkungen erheblich beeinflussen, ja symmetriebedingt aufheben, auslöschen, kompensieren oder einfach nur ungenutzt (über eine scheinbare Systemgrenze) stromabwärts abfließen und damit aus dem komplexen Wechselwirkungsgeschehen um das Tragflügelssystem verschwinden. Schade, eigentlich.

Obwohl: die „Jet-Wirkung“ einer fluidmechanischen Wirbelspule mit ihrer bis zu dreifachen Geschwindigkeitsüberhöhung in ihrem Kern ist durchaus imposant, wie Messergebnisse³⁴ am Windkanal des FG Bionik und Evolutionstechnik der TU Berlin in den 80er Jahren zeigten. Das Interessante an jeder Energiebetrachtung um ein konzentrisches, kohärentes Wirbelfadensystem ist der hier herrschende Umstand, dass der überwiegende Anteil der (theoretischen) Impulswirksamkeit aus Symmetriegründen kompensiert „erscheint“ aber in (Wechsel-) Wirklichkeit nicht verloren gegangen ist. Er zehrt sich ja nicht auf, oder wird verdissipiert, in Reibung verbraucht oder ähnliches. Energie bleibt erhalten. Wir kommen eben nur nicht an sie heran. Soweit der stationäre Fall.

Betrachten wir noch einmal das Bild: Dort oben, im Unwetter über Wien, in unserer fiktiven Geschichte aus dem Cockpit Knollers Doppeldecker, der Albatros, die keine Camel war, klatschen an diesem unheiligen Abend die Gewitter-Böen nur so herein. Eine Bö ist eine rasche Richtungsänderung der Strömung und wird von dem (armen) Knoller in seiner Maschine (Lagrange) als eine Geschwindigkeitsänderung wahrgenommen. Das Flugzeug (Lagrange) fliegt mit der so genannten scheinbaren Strömungsgeschwindigkeit. Plötzlich reißt die

³⁴ Siehe auch <https://de.wikipedia.org/wiki/Windkonzentrator>

Zum Prinzip des gespreizten Vogelflügels: im Windkanal die Erzeugung einer 2,7-fachen Windgeschwindigkeit!

Strömung an der Tragflügelprofiloberfläche ab und der Auftrieb an den Tragflügeln verschwindet, der Flieger nennt das ein „Luftloch!“ Wie treffend.

Und was passiert jetzt wohl mit dem durch den Auftrieb an der Tragfläche induzierten Wirbelsystem? Es verschwindet auch; für einen kurzen Moment. Und dann: Die Wirbelspule der Doppeldeckertragfläche erhält keine „Nahrung“ mehr und bricht (ideal wäre paarweise) zusammen – die Energie steckt aber noch drin, im Fluid: Flash – die Wirbelspule baut sich wieder auf, bei dreißig Metern pro Sekunde geht das rasend schnell, wupp, die Wirbelspule bricht wieder zusammen - die Energie steckt aber noch drin: Acceleration-Flash.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Innern der fluidmechanischen Wirbelspule kann im stationären Fall das mehrfache der Anströmgeschwindigkeit v_∞ des Tragflügels annehmen. Kann und tut das auch. Das elektrodynamische Äquivalent ist der (elektro-) magnetische Zuganker, der im Falle einer an die Spule angelegten Spannung, die so genannte „Lorenzkraft“ induziert. In genau diesem Sinne haben wir es nun mit dem fluidmechanischen Äquivalent der elektrodynamischen Transformatorschaltung zu tun.

Dies legt die Vermutung nahe, dass auch im nichtstationären Fall des Zusammenbruchs der fluidmechanischen Wirbelspule, eine intensive Beschleunigung einer Fluidmasse erfolgt. Es wäre zumindest eine brauchbare Erklärung des von Knoller postulierten „negativen Widerstands“ und zugleich auch eine Erklärung, warum Katzmayr sich so schwertat, diesen Effekt im Wiener Windkanal nachzustellen, denn der Betz-Knoller-Effekt funktioniert nur bei Mehrdeckertragflächen; und nur diese bilden auch ein fluidmechanisches Wirbelspulensystem aus.

In synthetischen (Labor-) Wirbelspulen kann die Beschleunigung der Fluidmasse von Umgebungsgeschwindigkeit auf die durch die Wirbelspule induzierte Innengeschwindigkeit derart eklatant sein, dass das Erzeugendensystem, die Wirbelspule selbst, im Windkanal und vor den

Augen des Experimentators implodiert! Soweit der nichtstationäre Fall. Ein einschränkender Fakt: die Geschwindigkeitsinduktion ist mit der „Gängigkeit“ des Wirbelspulenkörpers linear korreliert und nimmt mit dem Durchmesser der Wirbelspule ab. Kern dieser Phänomenologie ist immer das kohärente zirkulationsbehaftete Wirbelfadenmodell.

Das gesagte gilt (natürlich) gleichermaßen für bewegte Tragflächen. Für den oszillierenden Flügel des unter Wasser fliegenden Pinguins bringt Dr. Rudolf Bannasch Ende der 90er Jahre beeindruckendes Filmmaterial aus der Antarktis mit³⁵. Wir sehen einen Pinguin, der mit seinen Flügeln schlagend um seinen ziemlich optimalen (Schwimm-) Körper herum ein brezelförmiges Konstrukt mehrerer fluid-mechanischer Wirbeltori generiert, durch deren Zentrum er sich selbst als eine Art beweglicher (Spulen-) Massenkern bewegt. Oertel³⁶ leitet für den Insektenflug ein Ringwirbelprinzip her und wendet es auf den dynamischen Vogelflug an. Leider bleibt an dieser Stelle dann die Argumentation Oertels „stecken“ und wir erfahren nichts über induzierte Geschwindigkeiten aus fluidmechanischen Tori und natürlich genauso wenig über die Impulsmächtigkeit „Lagrange kohärente Spiralsysteme“.

³⁵ Gleich, A. (2013) Bionik: Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur? Springer-Verlag.

³⁶ Oertel, H., Ruck, S. (2008) Bioströmungsmechanik. Vieweg, Teubner, Wiesbaden.

Teil III. Die weiteren Zusammenhänge³⁷

Fangen wir noch einmal von vorne an. Seit fünfhundert Jahren besitzen wir Phänomenologien über fluidische Wirbel; dazu kommen einige Theorien, starke und schwache, bewiesene und unbewiesene Theorien, die eines gemeinsam haben: irgendwie möchten wir ihnen glauben, tun es aber nicht. Absolut glaubwürdig aber ist dies:

Nota il moto del liuello dell'acqua, il quale fa a uso de'capelli, che anno due moti, de'quali l'uno attede al peso del uello, l'altro al liniamento delle volte; così l'acque a le sue volte revertiginose, delle quali una parte attende al inpeto del corso principale, l'altro attende al mote incidente e riflesso.

Vielleicht etwa so:

Beobachte die Bewegung der Wasseroberfläche. Sie ähnelt dem Haar, das zwei Bewegungen vollführt. Die eine hängt vom Gewicht der Strähnen ab; die andere von der Linienführung der Locken; also macht Wasser sich drehende Wirbel, von denen ein Teil vom Schwung der der Hauptströmung erzeugt wird und der andere von zufälligen und mechanisch bedingten (reflesso, reflektierten?) Bewegungen. (Leonardo Da Vinci, 1510).

Es ist in gewisser Weise beruhigend, dass wir von Leonardo auch über das Holz erfahren, aus dem er seine Kernaussage schnitzt. Was in modernen Physikbüchern gerne vergessen wird, ist der Bezug auf das

³⁷ Passagen des Kapitels III sind entnommen aus Texten des Autors aus dem Jahre 2020; Siehe dort:
[Fel 20-3] Felgenhauer, Mi. (2020). Synthetische Lundgren-Wirbel und Lagrange Kohärente Objekte. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN(e-Book): 9783346276841, ISBN (Buch): 9783346276858, VNR: V922760
[Fel 20-2] Felgenhauer, Mi. (2020) Artifizielle Lagrange Kohärente Strukturen. About artificial Lagrangian Coherent Structures. GRIN-Verlag GmbH München, PDF-Version (pdf), ISBN: 9783346285904, ISBN (Buch): 9783346285911 Katalognummer. v913092
[Fel 20-1] Felgenhauer, Mi. (2020). Die Verteilung von Induktionswirkungen Lagrange Kohärenter Objekte. Zur Topographie und Kondition von Geschwindigkeitsfeldern. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN (e-Book): 9783346285904, ISBN (Buch): 9783346142146, VNR:535307

Erzeugendensystem: „... so macht Wasser sich drehende Wirbel.“ Es handelt sich um einen formenden, gestaltenden Vorgang; das Fluid selbst ist die Ursache für einen Wirbel; dies sollte auch das Modell eines Wirbels leisten, es erinnert vielleicht ein wenig an Spagetti?



Abb.18: Schnürsenkel, Nudeln, Karman oder so.. © Felgenhauer 2018

Ich habe zu diesem Zeitpunkt definitiv keine Ahnung, wohin uns dieser fremde Weg führen kann. Ich weiß nicht einmal, was wir hier überhaupt „sehen“, ohne nur, dass der Satz auch von Helmholtz hätte stammen können: „Spagetti sollten niemals während des Kochens oder des Essens zerteilt oder zerkleinert werden“, also: erhalte die Kohärenz der Struktur!

Wir lesen es bestenfalls als Kohärenz einer (zusammenhängenden Wirbel-) Topologie und kommen nicht umhin, für dieses fremdartige Wirbelgebilde Aussagen über dessen Systemgrenze und sein Innenmilieu zu suchen.

Falls es überhaupt ein Wirbel ist. Im tradierten Sinne. Vielleicht führt uns diese Geschichte zu einem Modell „ordentlich“ aufgewickelter Fäden oder Flächen. Ordentlich würde ich nennen: ein homotopes, Gestalt erhaltendes, zusammenhängendes gleich kohärentes Objekt. Wir werden die Fragen um „gewickelter Flächen“ nur dann beantworten, wenn wir uns ihre Entstehungsgeschichte neu erzählen.

Spiralige Wirbelstrukturen. Im Netz finden wir zahlreiche Abbildungen, Filme und Computersimulationen Karman'scher Wirbelstraßen. Es ist definitiv eine gute Empfehlung genügend hoch aufgelöste Ergebnisfilme aus CFD-Simulationen³⁸ anzuschauen. Anschaulich für die Entwicklung einer Karman'schen Wirbelstrasse ist der Nachlauf aus der Umströmung einer kreisscheibenförmigen Boje. So wunderschön die CFD-Videos auch sind, Überschrift: „lebendiges Totwasser“, so erfolglosarm sehen wir uns dabei auf der Suche nach einem bequem weidebaren Energieangebot in einer Strömung nur einen klitzekleinen Schritt weiterkommen.

Abweidbar? Aus einer geschlossenen Struktur? Von welcher Art und Gestalt ist dieses fluidmechanische Konstrukt, wie funktioniert seine Systemgrenze und was umschließt sie? Letztendlich müssen wir klären: Soll ein finit-kohärentes Gebilde zuerst „geknackt“ werden, bevor seine Energie frei wird? Ist es das, was der Fisch macht?

Phänomenologische Untersuchungen legen den Verdacht nahe, dass es sich bei der von einer (symmetrischen) Störung im Strömungsfeld generierten Struktur um eine Gestalt handelt, die mit den verfügbaren Wirbelmodellen nichtzutreffend beschrieben wird. Ursache ist die wenig berechnungs-freundliche Wicklung des in der voll ausgeprägten Karman'schen Wirbelstraße detektierten, irgendwie elegant gefalteten, linienförmigen (Nudel-) Objekts; sofern wir uns an dieser Stelle

³⁸ Computational Fluid Dynamic, CFD, fasst methoden der numerischen Strömungsmechanik zusammen. Sie hat das Ziel, strömungsmechanische Probleme approximativ mit numerischen Methoden zu lösen.

Betrachtungen in der Ebene vorbehalten (Abb.18.). Ist dieses elegante, spulenförmige und nach den oben eingeführten Kriterien geformte Objekt tatsächlich als „Wirbel“ zu bezeichnen?

Gut, vielleicht können wir dazu mehr sagen, wenn wir etwas über das Binnenmilieu des Objekts wissen: wieviel Energie enthält das System, wie ist diese verteilt und welche sekundären lokalen Wirkungen gehen von ihm aus. Aus den anderen Wirbelmodellen, dem Potentialwirbel, dem Festkörperwirbel und dem Rankine-Modell konnten wir die Geschwindigkeitsverteilung unmittelbar ablesen, aus dem einfachen Grund, weil diese Wirbelmodelle insbesondere über die (radial abgetragenen) Geschwindigkeiten, wenn nicht sogar definiert, dann doch wenigstens motiviert sind.

In einer derart komfortablen Situation sind wir bei unserem fremdartigen Objekt leider nicht, aber: das ist doch eine hübsche Aufgabe: „suche die Geschwindigkeitsverteilung über das (ebene) Betrachtungsgebiet unseres (tja, wie heißt er eigentlich, der freche Wirbel?) wohlgeformten Rotations- Objekts“.

Da ich 2018 wirklich nicht weiß, wie diese Geschichte ausgeht – der geneigte Leser wohnt einem einmaligen Experiment bei – und wenn es schief geht, wird dieser Text sowieso niemals veröffentlicht, woraus selbiger Leser unmittelbar ableitet, aus dem Fakt, dies hier überhaupt zu lesen, dass es wohl irgendwie geklappt haben sollte oder der Text in einen hoffnungslosen Fall tätigen Altersnarzissmus hineingezogen worden sein muss - da ich also nicht weiß, was mir auf den nächsten (lieben) Seiten noch so widerfahren wird, bekommt dieses spiralförmige Gebilde den Arbeitstitel „Laborwirbel“.

Ein synthetisches Ding. Mit beschränkten Eigenschaften. Bleiben wir also zunächst beim ebenen, zirkulationsbehafteten Laborwirbel. Von zirkulationsbehafteten Gebilden, etwa wenn sie aus einem (beliebi-

gen) Wirbelfaden geformt werden, vermuten wir (vermute ich; ja, ja, ich trage die Verantwortung für dieses Himmelfahrtskommando), dass dieser Wirbelfaden und jeder Punkt auf diesem Wirbelfaden in seiner Umgebung Geschwindigkeiten induziert (wir werden später gesagt haben: „Biot und Savart“). Jeder Punkt (..und gesagt haben werden: „Quellpunkt“), der Element des Labor-Wirbelfadens ist, induziert an jedem Punkt (und auch gesagt haben werden: „Aufpunkt“) der Umgebung dieses Wirbelfadens einen gewissen Anteil der dort herrschenden Geschwindigkeit. Die Umgebung „kumuliert“ also die Geschwindigkeitswirkungen des Wirbelfadens. Somit ist jeder Ort des Wirbelfadens mit dem erwirkten Milieu an jedem Ort seiner mittelbaren Umgebung kausal verknüpft. Diese hier postulierte (wunderbare) Eigenschaft des Feldes, deren Begründung aus der namensgleichen Feldtheorie stammt und die wir unten – so hoffe ich sauber auseinandergedröselt - als das Gesetz von Biot und Savart - kennen lernen werden, ist letztendlich meine vage Rückversicherung dafür, dass die Geschwindigkeitsverteilung einer beliebigen Struktur, also auch einer durchaus verzwickten Laborwirbel-Topologie, analytisch ermitteln werden kann.

Die Art und Form der Wicklung des Wirbelfadens ist gegebenenfalls, neben der Kenntnis einer Zirkulation an jeder Stelle an diesem Wirbelfaden, das entscheidende wirkformende Element des Modellsystems. Von der inneren Struktur des Wirbelmodells wissen wir natürlich (nur) das, was wir modellbeschreibend vorgeben. Ich lege mir nun ein Berechnungsinstrument zurecht.

Geschwindigkeit und Strömungsfeld. In meinem Modell sei die zu einem Wirbelfaden gehörige Strömung, bis auf den Wirbelfaden selbst, wirbelfrei. Wäre der Wirbelfaden gerade, sprächen wir von einem Potentialwirbel. Aus der elementaren Strömungsmechanik wissen wir, dass eine Strömung durch ihr Geschwindigkeitsfeld

beschrieben werden kann und eine Wirbelströmung durch ihr Wirbelfeld. Geschwindigkeitsfeld und Wirbelfeld hängen physikalisch zusammen.

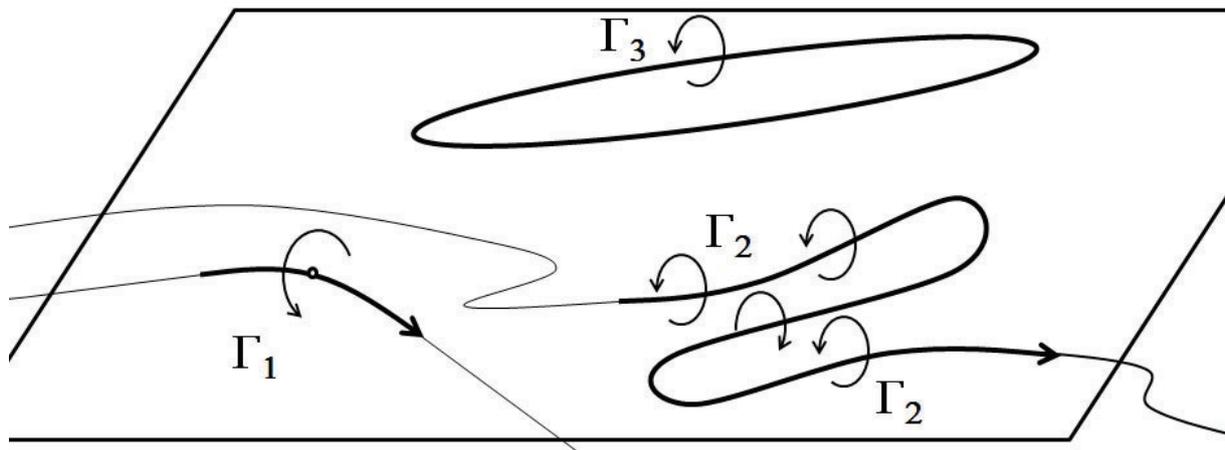


Abb.19: Wirbelfäden und deren zugehörige Zirkulation Γ [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] an unterschiedlichen Orten in einer Ebene. © Mi. Felgenhauer 2018.

In der kleinen Skizze oben sehen wir „Versatzstücke“ zweier Wirbelfäden, deren Punkte alle einer gemeinsamen Ebene (wie angedeutet) angehören sollen. Das rechte System ist dabei ein klein wenig komplizierter als das linke Wirbelfadensystem. Verfolgen wir die Zirkulation, die hier Lagrange-links-drehend angenommen sei, sehen wir sofort, dass – der Topologie geschuldet – links-drehende und (scheinbar) rechts-drehende Zirkulation recht dicht nebeneinander existiert. Natürlich sind die Wirbelfäden ihrer Definition nach unendlich lang, sofern sie nicht geschlossene Strukturen bilden, etwa kreisringe oder an einer Wand oder Phasengrenze enden (Helmholtz). Elektrotechniker hätten an dieser Stelle ein gravierendes Problem, denn in deren Welt soll es (vielleicht und angeblich) derartige

Monopole geben, aber gesehen hat sie bislang noch Niemand. Gemeinsam haben Elektrodynamik und Fluidmechanik die Angst vor sich kreuzenden Feldlinien. Dennoch, das lustige fluidmechanische Gekringel jedenfalls wird uns später noch ein wenig Sorgen bereiten. Oder aber zur Lösung unserer Anfangsfrage beitragen?

Rechtzeitig taucht nun bei der Betrachtung von Geschwindigkeitsfeld und Wirbelfeld das (aus der allgemeinen Feldtheorie stammende und) in der Elektrodynamik geläufige Gesetz von **Biot und Savart** auf. Ist das Geschwindigkeitsfeld bekannt, kann mit den Beziehungen von Biot und Savart das Wirbelfeld berechnet werden. Die Differentiation des Geschwindigkeitsfeldes (Bildung der Rotation) ist dann das Wirbelfeld. Gleichsam kann man das Geschwindigkeitsfeld aus dem Wirbelfeld berechnen. Die Integration des Wirbelfeldes ist dann das Geschwindigkeitsfeld. Elektrotechniker sagen das gerne einfach mal so dahin; wir hingegen haben so richtig Respekt. In der Strömungstechnik entspricht die Integration des (fluidmechanischen) Wirbelfeldes der Anwendung des Gesetzes von Biot und Savart auf eine fluidische Strömung.

Oben hatte ich die Zirkulation wie selbstverständlich in die Argumentation einbezogen. Schauen wir doch einmal, welche merkwürdige Dimension die Zirkulation besitzt. Mit der Zirkulation Γ bezeichnet man die Stärke eines Wirbels, bzw. den Beitrag des Ringintegrals der Zirkulationsgeschwindigkeit v_Γ über die Weglänge s_Γ . Die Dimension der Zirkulation $[\text{m}^2/\text{s}]$ ist mit der (kinematischen (also der um die Gravitation bereinigte dynamische) Viskosität identisch. Manchmal habe ich so einen Gedanken, dass hier noch ein kleines fluidmechanisches Wunder auf uns wartet, aber ich kann den Gedanken, dass in der Reynolds-Zahl eine Zirkulation im Nenner steht noch nicht so recht fassen. Würden wir nicht den beliebigen Fall, sondern einen Festkörperwirbel betrachten, wäre der Geschwindigkeitsgradient sofort ermittelt, denn bei einem starren Wirbel herrscht eine

konstante Winkelgeschwindigkeit ω_W und an einem beliebigen Abstand r die Tangentialgeschwindigkeit v_{TW} . Tragen wir also erste nützliche Beziehungen zusammen:

Aus der Integration des Linienintegrals folgt:

Zirkulation	$\Gamma = v_\Gamma \cdot s_\Gamma$	$[m^2s^{-1}]$
Zirkulationsgeschwindigkeit	v_Γ	$[ms^{-1}]$
Weglänge	s_Γ	$[m]$
Winkelgeschwindigkeit	ω_W	$[s^{-1}]$
Tangentialgeschwindigkeit	$v_{TW} = r \cdot \omega$	$[ms^{-1}]$
Wirbelstärke	Ω	$[s^{-1}]$
Dichte	ρ	$[kg\ m^{-3}]$
Geschwindigkeit (Fernfeld)	v	$[m\ s^{-1}]$
Infinitesimaler Winkel	$d\beta$	$[^\circ, rad]$
Mit Ringintegral (über Kreis)	$\int l\ ds = 2\ \pi\ r$	$[m]$
Tangentialgeschwindigkeit v_T	$r\ \omega$	$[ms^{-1}]$

In dieser Tabelle haben schon einmal alle Schreckensbegriffe versammelt. Oben im Text unterschieden wir Festkörperwirbel und Potentialwirbel, diese besitzen einen Geschwindigkeitsgradient im fernerem Feld sowie Rankine-Wirbel, die ein Modell für die Superposition von starrem Wirbel und Potentialwirbel sind.

Bei anderen Fragestellungen kann mit der Zirkulation und dem Ringintegral der Zirkulationsgeschwindigkeit über die Weglänge s , die Auftriebskraft F_A eines Flügels mit der Spannweite b angegeben werden. Es entsteht eine handliche Formulierung der Zirkulation um einen Tragflügel nach Kutta-Joukowski³⁹.

³⁹ Der Satz von Kutta-Joukowski beschreibt die Proportionalität des dynamischen Auftriebs zur Zirkulation.

Auftrieb (Lift) $F_A = \Gamma \cdot \rho \cdot v \cdot b$ [N] aus $[m^2\ s^{-1}\ kg\ m^{-3}\ m\ s^{-1}\ m]$, $[kg\ m\ s^{-2}]$

es gilt: $F_A = c_L \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ [N] aus $[m^2\ kg\ m^{-3}\ m^2\ s^{-2}\ m]$, $[kg\ m\ s^{-2}]$

und: $\Gamma \cdot \rho \cdot v \cdot b = c_L \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ [N] dto.

Damit ist die Zirkulation um einen Tragflügel: $\Gamma = \rho \cdot v \cdot b = c_L \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 / \rho \cdot v \cdot b = c_L \cdot A \cdot v / 2 \cdot b$ $[m^2\ s^{-1}]$

Eine einfache Lagrange- kohärente topologieerhaltende Wirbelkomposition ist die geschlossenen Wirbelschleife, ein Konstrukt das es in der Natur tatsächlich gibt. Um einfache Wirbelstrukturen berechnen zu können bedienen wir uns gelegentlich eines Tricks, bei dem wir uns beispielsweise eine Wirbelspule aus einer Aneinanderreihung kreisbahniger Ringwirbel denken. Diese sind einer Spirale physikalisch sehr ähnlich. In gleicher Weise ließen sich konzentrische Systeme „aus Kreisbahnen zusammenmontieren“. Auf einer Kreisbahn und mit der Winkelgeschwindigkeit ω [s^{-1}] ist die Zirkulation:

$$\Gamma = \omega 2 \pi r^2 \quad [m^2 s^{-1}]$$

Zur Untersuchung ebener und wirbelfreier Strömungen, klären wir zuerst die kinematische Bedeutung der Begriffe „Wirbelstärke und Zirkulation“. Die Rotation der Geschwindigkeit \underline{v} ist die Wirbelstärke $\underline{\Omega}$

$$\underline{\Omega} = \text{rot } \underline{v} \quad \text{.. mit den Komponenten } \Omega_i = \epsilon_{ijk} (\delta v_k) / (\delta x_j)$$

Vor der partiellen Ableitung steht ϵ_{ijk} , der Einheitsvektor. Ich werde weiter unten zeigen, dass die „Richtungs-Information“ entscheidend ist für die Ermittlung der pfadabhängigen (Lagrange) Geschwindigkeitsinduktion im umgebenden Strömungsfeld.

Strömungen, in denen die Wirbelstärke verschwindet, heißen wirbelfreie Strömungen; es sind Potentialströmungen und es sind rotorfreie Systeme. Alles, außer der Wirbelfaden-Struktur selbst, ist also rotorfrei und für unsere weitere Argumentation ist es wichtig, dass wir die Zirkulation des Wirbelfadens im Auge behalten.

Strömungen, in denen die Wirbelstärke von Null verschieden ist, heißen wirbelbehaftete Strömungen oder Wirbelströmungen. In wirbelbehafteten Strömungen bilden die Geschwindigkeit und die

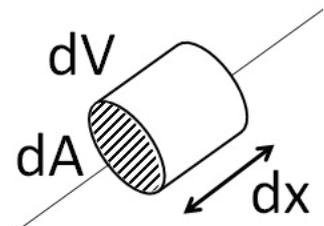
Wirbelstärke ein Vektorfeld. Die Wirbellinie im Feld der Wirbelstärke ist eine Analogie zur Stromlinie im Geschwindigkeitsfeld. Die Wirbellinie ist somit eine Kurve, die in jedem Punkt den Vektor der Wirbelstärke tangiert. Die Zirkulation Γ ist dieserart das Kurvenintegral der Geschwindigkeit \underline{v} längs einer geschlossenen Kurve im Strömungsfeld:

$$\Gamma = \int \underline{v} \, dx \quad \text{.. mit den Komponenten: } \Gamma = \int v_i \, dx_i$$

Der **Satz von Stokes**⁴⁰ besagt nun, dass das Flächenintegral der Wirbelstärke $\underline{\Omega}$ über eine Fläche A gleich ist der Zirkulation Γ längs ihrer Randkurve x . Für einen Volumenstrom durch eine beliebige Fläche gilt immer $V = \int \underline{v} \, dA$ (Abb.20). Für eine Zirkulation längs einer beliebigen geschlossenen Kurve gilt:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \int \underline{\Omega} \, dA. \\ \Gamma &= \int \underline{v} \, dx = \int \underline{\Omega} \, dA \quad \text{oder komponentenweise} \\ \Gamma &= \int v_i \, dx_i = \int \Omega_i \, dA_i \end{aligned}$$

Das ist natürlich schwer zu verstehen. Warum haben wir eine Drehbewegung (Zirkulation) im Körbchen, wenn wir die Geschwindigkeiten längs ein es Weges aufsammeln, denn nichts anderes weist uns ja das Integral an?



Die Wirbelstärke $\underline{\Omega}$ auf einer Fläche (sprich: Ebene) betrachtet und aufsummiert ist ebenfalls mit der Zirkulation identisch.

Ziel dieser Rede ist die von einem Wirbelfadenelement in beliebigen Strömungsfeldern induzierte Geschwindigkeit. Dazu betrachte ich

⁴⁰ Der Satz von Stokes ist ein nach Sir George Gabriel Stokes benannter Satz aus der Differentialgeometrie. In der allgemeinen Fassung handelt es sich um einen Satz über die Integration von Differentialformen.

zunächst einmal ein infinitesimal kleines Stück des Wirbelfadens in einem inkompressiblen Fluid (Abb.21).

Das kleine zylinderförmige Wirbelfadenelement habe in der euler'schen Betrachtungsweise die Länge dx (bzw. ds in Lagrange), die Querschnittsfläche dA und das Volumen $dV=dA dx$. Wir wissen, dass sich die Wirbelstärke Ω eines infinitesimal kleinen Stücks des Wirbelfadens im Quellpunkt zu der induzierten Geschwindigkeit v_i in einem beliebigen Aufpunkt linear verhält, also: $dv_i \sim \Omega dA$.

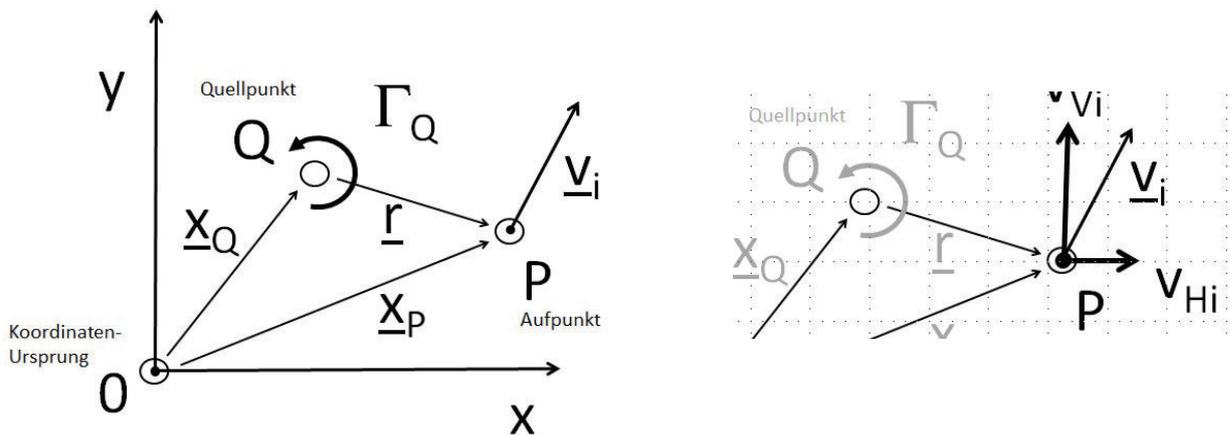


Abb.21: Das Wirbelfadenelement an einem beliebigen Punkt Q im Strömungsfeld; Aufpunkt P und vektorielle Geschwindigkeit \underline{v} dort.

Wir sehen in der Abbildung(21) das Wirbelfadenelement an einem beliebigen Ort im Strömungsfeld, mit dem Koordinatenursprung $(0,0)$, dem Quellpunkt Q und Aufpunkt P, an dem die induzierte Geschwindigkeit v_i ermittelt wird. Die induzierte Geschwindigkeit v_i geschrieben in ihren horizontalen und vertikalen Komponenten. Sodann ist die Herkunft der Flächeneinheit in der Dimension der Zirkulation erklärt und die Einheit der Wirbelstärke Ω ist $[s^{-1}]$ eine Frequenz.

Die beiden Sätze nach Biot und Savart:

Satz1: Die Wirbelstärke in einem Quellpunkt Q im Geschwindigkeitsfeld induziert im Aufpunkt P dieses Geschwindigkeitsfeldes einen Teil der dortigen Geschwindigkeit.

Satz2: Die Geschwindigkeit im Aufpunkt P ist die Summe der Induktionswirkungen aller Quellpunkte des Strömungsfeldes. Quellpunkte sind die Punkte, an denen die Wirbelstärke nicht verschwindet.

Das Biot-Savart'sches Gesetz⁴¹ gilt im dreidimensionalen Raum und lautet in differentieller Form:

$$d\mathbf{v} = (\Gamma/4\pi) \cdot (d\mathbf{s} \times \underline{\mathbf{r}})/r^3$$

Für den besonderen Fall, dass der Vektor \mathbf{r} orthonormal auf der (bei PCO theoretisch unendlich langen) Linie S des Wirbelfadens steht und damit die Geschwindigkeit $d\mathbf{v}$ im Punkt P in einem nunmehr senkrechten Abstand zum Wirbelfadenelement induziert wird, liefert die Integration des Biot-Savart'schen Gesetzes aus der differentieller Form die einfache aber elementare Beziehung: $\underline{\mathbf{v}}_i = \Gamma/2\pi \underline{\mathbf{r}} !$

Die induzierte Geschwindigkeit ist ein Vektor. Die Zirkulation ist eine pfadabhängige Größe. Im ebenen Fall verschwinden die Z-Komponenten des Abstandsvektors $\underline{\mathbf{r}} = \underline{\mathbf{x}}_P - \underline{\mathbf{x}}_Q$ und es vereinfacht sich (orthogonal auf den Wirbelfaden) der Vektor: $\underline{\mathbf{r}} = ((\underline{\mathbf{x}}_P - \underline{\mathbf{x}}_Q)^2 + (\underline{\mathbf{y}}_P - \underline{\mathbf{y}}_Q)^2)^{1/2}$

⁴¹Das Biot-Savart-Gesetz stellt (in der Elektrodynamik) einen Zusammenhang zwischen der [magnetischen Feldstärke](#) und der [elektrischen Stromdichte](#) her und erlaubt die räumliche Berechnung magnetischer Feldstärkenverteilungen anhand der Kenntnis der räumlichen Stromverteilungen. Meistens wird das Gesetz als Beziehung zwischen der [magnetischen Flussdichte](#) und der elektrischen Stromdichte behandelt.

Üblicherweise werden wir in der Simulationspraxis die induzierte Geschwindigkeit in ihren vertikalen y- und horizontalen x-Komponenten schreiben, also:

$$v_i [v_{iH}, v_{iV}] = [v_i \sin \alpha, v_i \cos \alpha]$$

$$\underline{v}_i = v_i (v_{iH}, v_{iV}) = \Gamma (\underline{v}_{ueH}, \underline{v}_{ueV}, c_L, t) / (2 \pi r(r_H, r_V))$$

horizontal: $v_{iH} = v_i = -\Gamma (y_P - y_Q) / ((x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2) / 2 \pi$

vertikale: $v_{iV} = v_i = \Gamma (x_P - x_Q) / ((x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2) / 2 \pi$

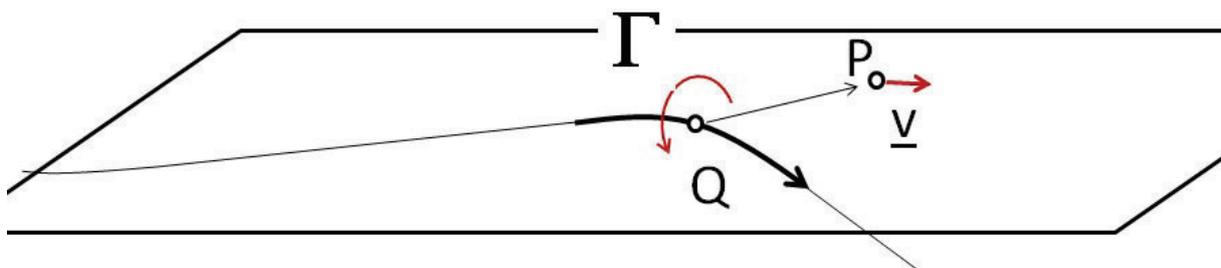


Abb.22: Verallgemeinertes Wirbelfadenelement an einem Punkt Q im Strömungsfeld; Aufpunkt P und vektorielle Geschwindigkeit \underline{v} dort.

Von einem unendlich langen, verzweigungsfreien Wirbelfaden aus soll im Quellpunkt Q mit den Koordinaten (x_Q, y_Q) im Aufpunkt P im Feld mit den Koordinaten (x_P, y_P) ein (An-) Teil einer Geschwindigkeit dort induziert werden. Neben diesem einen Geschwindigkeitsquantel, kommen natürlich alle anderen Quantel dazu, so dass im Aufpunkt P (letztendlich) ein kumuliertes Konstrukt an Feldeigenschaften (Geschwindigkeit) existiert. Im Quellpunkt Q können wir die Zirkulation Γ angeben.

Für die induzierte Geschwindigkeit $\underline{v} = \Gamma / 2\pi r$ findet man die induzierte Geschwindigkeit \underline{v}_i und ihre Komponenten in der (x,y)-Ebene:

horizontale v_{Px} :	$v_{iH} = v_i \sin \alpha$	mit $\sin \alpha = (y_P - y_Q) / r$
vertikale v_{Py} :	$v_{iV} = v_i \cos \alpha$	mit $\cos \alpha = (x_P - x_Q) / r$

Damit haben wir den Induktionsansatz für ein beliebiges Wirbelfadenelement im Strömungsfeld; da dieses aber in seiner (induktiven) Wirkung von seiner (Aus-) Richtung abhängt, wird eine Bilanzierung in Komponenten empfohlen.

Fluid within a Fluid

Ein unendlich langer, verzweigungsfreier Wirbelfaden bildet einen separierten Fluidkörper innerhalb eines Fluids. Von der Definition Lagrange Kohärente Systeme (LCS) unterschieden sind unendlich lange, verzweigungsfreie Wirbelfäden dadurch, dass bislang dem LCS kein inneres Milieu zugeschrieben wird, was ich erstaunlich finde. In den vergangenen zwei Jahren habe ich nicht ermitteln können, ob es sich um einen klugen Schachzug oder ein Versäumnis handelt.

Lagrange-Kohärenzstrukturen (LCS) sind unterschiedliche Oberflächen von Trajektorien in einem dynamischen System , die über ein interessierendes Zeitintervall einen großen Einfluss auf benachbarte Trajektorien ausüben. Die Art dieses Einflusses kann variieren, erzeugt jedoch ausnahmslos ein kohärentes Trajektorienmuster, für das das zugrunde liegende LCS als theoretisches Herzstück dient. Bei der Beobachtung von Tracermustern in der Natur kann man leicht kohärente Merkmale identifizieren, aber es ist häufig die zugrunde liegende Struktur, die diese Merkmale erzeugt, von Interesse. Während LCS im Allgemeinen in jedem dynamischen System existieren, ist ihre Rolle bei der Erzeugung kohärenter Muster in Flüssigkeits-

strömen möglicherweise am leichtesten zu beobachten.
(https://de.qaz.wiki/Lagrangian_coherent_structure)

Wenn ich es mir hätte aussuchen können (und ich hatte es mir aussuchen können), würde ich eine Phänomenologie unendlich langer, verzweigungsfreier Wirbelfäden lieber an die klassische Wirbelphysik Helmholtz anlehnen und daran zweifelnd, dass es sich um einen Fortschritt⁴² handelt, statt intervenierend in die laufende Definitionsfindungsphase, denn als solche möchte ich den Stand der Wissenschaft aus meiner durchaus begrenzten Sichtweise bezeichnen, zu Lagrange Kohärenten Strukturen einzugreifen!

Die Zuweisung impliziter Milieu-Eigenschaften auf zusammenhängende, unendlich lange, verzweigungsfreie Wirbelfäden, verstehe ich als einen Baustein zu einer Phänomenologie Lagrange Kohärenter Objekte, Strukturen und Systeme. Objekte die seitens ihrer Strömungsmechanik auf der tradierten Lehre und der ihr innewohnenden Physik aufbauen. Das diesen Objekten inhärente und implizite innere Milieu folgt also jenen Wirbelsätzen, die Hermann von Helmholtz⁴³ um 1859 formuliert.

Der erste Wirbelsatz bedeutet, dass sowohl die Zirkulation längs der Randkurve einer Fläche, die ganz auf dem Mantel einer Wirbelröhre liegt, verschwindet als auch, dass die Zirkulation verschiedener Querschnitte einer Wirbelröhre gleich ist. Der zweite Wirbelsatz besagt, dass Wirbelröhren zugleich Stromröhren sind, Wirbel an Materie (Fluid) anhaften und drittens, Teilchen, die einmal eine Wirbellinie gebildet haben, dies auch weiterhin tun (Kohärenz). Der

⁴² Zum Begriff Fortschritt: „Nicht fort sollt Ihr Euch entwickeln, sondern hinauf!“ Friedrich Nietzsche, aus: Also sprach Zarathustra (Untertitel: *Ein Buch für Alle und Keinen*, 1883–1885). Friedrich Wilhelm Nietzsche (* 15. Oktober 1844 in Röcken; † 25. August 1900 in Weimar) ein deutscher klassischer Philologe und Philosoph.

⁴³ Sinngemäß nach: https://de.wikipedia.org/wiki/Helmholtzsche_Wirbelsätze, Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz, ab 1883 von Helmholtz, (* 31. August 1821 in Potsdam; † 8. September 1894 in Charlottenburg bei Berlin) war ein deutscher Physiologe und Physiker. Als Universalgelehrter leistete er wichtige Beiträge zur Optik, Akustik, Elektrodynamik, Thermodynamik und Hydrodynamik.

der dritte Wirbelsatz fordert die zeitliche Konstanz der Zirkulation in einer (und um eine) Wirbelröhre. Die Helmholtz'schen Wirbelsätze sind Grundlage der Physik des nachfolgend vorgeschlagenen spiraligen Lagrange Kohärenten Objekts.

Die Anwendung nun dieserart zirkulationsbehafteter Lagrange Kohärenter Modelle auf makroskopische Strömungsgebilde, wie wir sie beispielsweise in den Strömungsbildern der allabendlichen Wetterkarte identifizieren, erscheint allerdings problematisch. Hier versagt meiner Ansicht nach das Helmholtz'sche Modell des implizit zirkulationsbehafteten inneren Milieus und Vorstellungen über separierende Oberflächen eines dieserart beschriebenen Fluids innerhalb eines Fluids greifen Sinn und Raum.

Fluid within a Fluid. Es erfüllt mich mit großer Euphorie heute, im März 2021 und mitten in einer alle Anderen lähmenden Pandemie, Zeuge eines poetischen, schöpferischen Vorgangs sein zu dürfen, Beobachter der ersten Kondensation einer fremdartigen Theorie.

Der neuartige Ansatz über das innere Milieu Lagrange Kohärenter Objekte interpretiert die „Idee einer künstlichen Viskosität“, wie sie heute in den Theorien Partikel basierter Strömungs-Simulation⁴⁴ (Smoothed-particle hydrodynamics, SPH) Anwendung findet auf eine neue und radikale Weise. Nicht eine artifizielle Viskosität fittet die Navier-Stokes-Gleichung, sondern die dem Lagrange Kohärenten Objekt implizite Zirkulation Γ_i .

Die Suche nach den theoretischen Grundlagen eines impliziten pfadabhängigen Ansatzes sind Gegenstand rezenter Bemühungen um

⁴⁴ Smoothed-particle hydrodynamics (SPH; deutsch: geglättete Teilchen-Hydrodynamik) ist eine numerische Methode, um die Hydrodynamischen Gleichungen zu lösen. SPH ist eine Lagrange-Methode, d. h. die benutzten Koordinaten bewegen sich mit dem Fluid mit. SPH ist eine besonders robuste Methode (nach wikipedia).

eine Lagrange Implizite Vorticity-Theorie, LIV. Erste Überlegungen zu einem Ansatz (impliziter) Zirkulation erarbeiteten Cassey⁴⁵ und Naghdi bereits im Jahre 1991. Im Lichte moderner, Partikel basierter Strömungsmodelle erscheint die Idee einer Impliziten Zirkulation viel weniger theoretisch, sondern von einem nützlichen Praxisbezug. Mit der Massenbilanz und dem Impuls in Lagrange-Schreibweise folgt die Definition der Lagrange Impliziten Zirkulation:

$$\begin{aligned} \text{Massenbilanz:} & \quad d\rho/dt = -\rho \nabla \cdot \underline{\mathbf{v}} \\ \text{Impuls:} & \quad d\underline{\mathbf{v}}/dt = -(1/\rho) \nabla p + \underline{\mathbf{v}} \Delta \underline{\mathbf{v}} + \underline{\mathbf{g}} \\ \text{Lagrange Implizite Vorticity:} & \quad \Delta \underline{\mathbf{v}} (\underline{\mathbf{v}} + \Gamma) = d\underline{\mathbf{v}}/dt + (1/\rho) \nabla p - \underline{\mathbf{g}} \end{aligned}$$

Die Dimensionsanalyse liefert: $\Gamma \Delta \underline{\mathbf{v}}$ [$\text{m}^2/\text{s} \cdot 1/\text{m} \cdot \text{m}/\text{s}$] [m/s^2] für die Lagrange Implizite Vorticity (LIV) eine Konsistenz zur Einheit der zeitlichen Ableitung der lokalen Geschwindigkeit ($d\underline{\mathbf{v}}/dt$) [m/s^2].

In der Praxis der numerischen Simulation ist die Impulsbilanz zu diskretisieren, sodass wir die LIV als Zirkulationstensor behandeln werden. Diese Rede greift der Ausformulierung einer Theorie der Lagrange Implizite Vorticity voraus; das bitte ich zu entschuldigen.

Aber wir Alle haben in diesen Tagen und den vergangenen Monaten begriffen, dass wir sterblich sind⁴⁶: Fluid within a Fluid!

Eine Theorie Lagrange Kohärenter Strukturen (LCS) wurde in den frühen 2000er Jahren am Lefschetz Center for Dynamical Systems der Brown University, später an der ETH Zürich, dort am Department of Mechanical and Process Engineering, entwickelt. Das Akronym LCS

⁴⁵ J. CASEY & P. M. NAGHDI (1991) On the Lagrangian Description of Vorticity, in: Arch. Rational Mech. Anal. 115 (1991) 1-14. Springer-Verlag.

⁴⁶ Anmerkung in eigener Sache: Die Formel „ $\Delta \underline{\mathbf{v}} (\underline{\mathbf{v}} + \Gamma) = d\underline{\mathbf{v}}/dt + (1/\rho) \nabla p - \underline{\mathbf{g}}$ “ hätte ich gerne am 15.02.2021 in meiner Karnevals-Vorlesung an die Tafel geschrieben. Aber es gibt keine Fassenacht, keine Tafel und auch keinen Vortrag. Und im HomeOffice hört mir keiner zu.

(Lagrange Coherent Structures) stammt von Haller & Yuan (2000)⁴⁷. Haller suchte nach einem Ansatz, die abstoßenden und anziehenden Fluidbewegungen in Scherschichten zu beschreiben. Beschleunigte Scherschichten sind im Labor nur in speziellen mehrgebläsigen Windkanälen sicher generierbar. In Zürich wusste man aus der weitestgehend experimentellen Vergangenheit und hatte beobachtet, dass innerhalb fluidischer Regime Systemgrenzen im Sinne von „Materialoberflächen“ existieren, die zusammenhängende Strukturen von der restlichen Strömung separieren. Diese extraordinären Systeme entwickeln eine komplexe körper- und richtungsbezogene Dynamik innerhalb einer Strömung. Als man in Zürich mit der Forschung ansetzte, konnten die Wissenschaftler noch auf keine tragfähigen theoretischen Modelle zur quantitativen Beschreibung dieser sonderbaren physikalischen Geschehnisse zugreifen. Rasch wurde klar, dass es zukünftig großvolumiger, numerischer Modelle und komplexer Simulationen bedarf, die seltsamen Systemoberflächen der nunmehr Lagrange Coherent Structures (LCS) genannten Systeme, in Strömungsszenarien aus experimentellen und numerischen Daten zu isolieren und sie notfalls mit einer vereinfachenden Herangehensweise beschreibbar zu machen, sie zu verstehen. Hallers Forschung ging der Frage nach, ob es gelingen könnte, Mischung, Entmischung und Massetransport in und um Lagrange Kohärenter Systeme in komplexen fluidischen Systemen vorherzusagen oder sogar zu beeinflussen. Es wurden im Zuge der Theoriebildung nichtlineare dynamische (System-) Methoden entwickelt, um komplexe Probleme in der angewandten Wissenschaft und der Technik zu lösen, etwa die Analyse von Transportprozessen und Kohärenz in einem Ozean und in der Atmosphäre, die Echtzeiterfassung von Luftturbulenzen in der Nähe von Flughäfen, die Theorie und Kontrolle der instationären, aerodynamischen Trennung,

⁴⁷ Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence, G. Haller, G. Yuan Division of Applied Mathematics, Lefschetz Center for Dynamical Systems, Brown University, Providence, RI 02912, USA Received 11 February 2000; received in revised form 6 June 2000 ; accepted 10 July 2000 Communicated by U. F

die Dynamik von Trägheitsteilchen unter Gedächtniseffekten und die Theorie des dynamischen Übergangszustands bei chemischen Reaktionen.

Eine Phänomenologie Lagrange Kohärenter Objekte (LCO) deutet „spiralige Gebilde“ als Systeme, die zirkulationsbehaftet sind, in einem Strömungsfeld separiert auftauchen und mit diesem in Wechselwirkung stehen. Sie sind – aus der Sicht dieser Phänomenologie – von ihrem Wesen her Wirbelfäden im Sinne der Helmholtzschen Wirbeltheorie und gleichsam Fluidische Trajektorien, wie Haller sie beschreibt. Das soll zur Folge haben, dass ohne eine wirbelanfachende äußere Kraft das wirbelfreie Strömungsgebiet weiterhin wirbelfrei bleibt, Fluidelemente, die einem zirkulationsbehafteten LCO anliegen, dort verbleiben und die Zirkulation entlang eines Lagrange Kohärenter Objekts konstant bleibt. Das Lagrange Kohärente Objekt endet nicht irgendwo im Fluid oder an einer Phasengrenze, sondern betrachtet wird immer nur ein kleiner Abschnitt in vorgegebenen Systemgrenzen. Das Lagrange Kohärente Objekt platziert Induktionswirkungen in dem umgebenden Strömungsfeld, es „organisiert“ die Strömung. Ursache der Induktionswirkungen ist die dem Lagrange Kohärenten Objekt einbeschriebene Zirkulation die ihrerseits von einem Wechselwirkungsgeschehen bei der Entstehung des LCO hat. Entstehungsursachen Lagrange Kohärenter Objekte und Systeme sind aber nicht Gegenstand der Phänomenologie.

Nach der Potentialtheorie sind die pfadabhängigen Induktionswirkungen eines zirkulationsbehafteten Lagrange Kohärenten Objekts zunächst die in dessen Umgebung im Feld induzierten Geschwindigkeiten. Die (induzierte) Geschwindigkeit ist als physikalische Größe superponierbar und extensiv⁴⁸ und in Ebenen und Räumen mit

⁴⁸ Extensive Größen sind solche, die man sinnvoll addieren kann, für die es Bilanzen und Erhaltungssätze geben kann: Energie, Geld, Masse, Impuls, Volumen, Fläche, Länge, Zeit.

definierten Systemgrenzen bilanzierbar. Dies ist insofern von Bedeutung, dass diverse Quellen Q entlang eines LCO in deren Umgebung in allen Aufpunkten A partielle Geschwindigkeitsbeiträge induzieren, die sich zusammen mit den Randbedingungen (etwa der System-geschwindigkeit) des fluidischen Raumes zu einer Gesamt-geschwindigkeit kumulieren.

Die in das Strömungsfeld induzierten Geschwindigkeiten lassen Schlüsse auf das in das Feld induzierte Energie-Brutto zu. Die in das Feld induzierten Geschwindigkeiten lassen gleichsam Schlüsse auf die Impulsmächtigkeit der Induktionen zu. Der quantifizierbare qualitative Unterschied zwischen dem Energiegehalt und der Impulsmächtigkeit eines Systems ist die Richtungsabhängigkeit des Impulses und die scheinbare Richtungsfreiheit der Energie in den Systemgrenzen eines fluidischen Raumes.

Zwei unterschiedlich, richtungsbehaftet induzierte Größen „zehren“ sich auf, etwa der Impuls $\tilde{p} \sim mv$ [Ns], während aus den zweiten Potenzen die Energie $\tilde{e} \sim mv^2$ [Nm] immer positiv hervorgeht.

Die Qualität des Energiegehalts und der Impulsmächtigkeit kann sich also insofern unterscheiden, wenn wir die Erzeugendenwirkung (hier die induzierte Geschwindigkeit) in einer Bilanz „verrechnen“ oder eben nicht. Rein mathematisch kommt es entweder zu einer Kompensation der Wirkungen der Induktion oder eben nicht; die dem System inhärente Energie bleibt konstant und könnte unter bestimmten Umständen erscheinen.

Der Lundgren-Wirbel⁴⁹ ist ein Modell für die intermittierende Feinstruktur von Turbulenzen mit hoher Reynoldszahl; Lundgren schreibt: „Das Modell besteht aus schlanken coaxialen Spiralwirbellösungen, einem Ensemble zufällig orientierter strukturierter zweidimensionaler

⁴⁹ T. S. Lundgren (1982) Strained spiral vortex model for turbulent fine structure, *The Physics of Fluids* 25, 2193

Wirbel, die durch einen axialsymmetrischen Dehnungsfluss gedehnt werden.“ Lundgren spricht ferner von der Existenz eines selbst-ähnlichen und Entropie erhaltenden Bereichs im zweidimensionalen Kolmogorov- Entropie-Spektrum⁵⁰, der Fourier-Analyse über die Geschwindigkeitsquadrate in einer Schnittebene. Das Eindrehen der Spiralwindungen (schreibt Lundgren) erzeugt eine Kaskade von Geschwindigkeits-schwankungen in kleinerem Maßstab. Ergebnisse sind unempfindlich gegenüber der Zeitabhängigkeit der Dehnungsrate, einschließlich selbst intermittierender Ein-oder Aus-Dehnungen. Im Wesentlichen also war 1982 alles gesagt. Die Grundstruktur, die Geschwindigkeitsverteilung, das Energiespektrum. Und Transienz. Und es gibt periodische Phänomene (homomorphe Ein-Aus-Dehnungen) die die geometrische Erscheinung des Wirbels stabilisieren (in Schach halten).

Die Form des Lundgrenwirbels ist eng angelehnt an die mathematische Beschreibung der nach Pierre de Fermat⁵¹ benannten Spiralen. Das Bild der Lundgren-Wirbel fittet die Idee der Fermat-Spirale leider nicht vollständig, denn wesentlich an dieser (Fermat) ist der mit dem Erzeugendenradius R abnehmende Windungsabstand. In diesem Sinne ist das hier zur Diskussion stehende Objekt gerade keine fermat'sche oder parabolische Kurve, aber eine Variante ihrer. Vollständig ist die Fermatsche Spirale dann, wenn ein Ast zum Mittelpunkt hineinführt, die Kurve dort einen Wendepunkt besitzt und der zweite Ast zentral-symmetrisch aus der Spirale wieder hinausführt. Diese Eigenschaft möchte ich in das Modell übernehmen (Abb.23: LundgrenForm)⁵².

Krasny (1985) gibt eine Entwicklungs-Gleichung für typische von Lundgren vorgeschlagene spiralige Formationen als periodisches

⁵⁰ Die Mikroskala von Kolmogorow ist die kleinste Skala bei der Betrachtung der Energiekaskade einer turbulenten Strömung.

⁵¹ Pierre de Fermat [pjɛːʀ dəfɛʀ' ma] (* in der zweiten Hälfte des Jahres 1607 in Beaumont-de-Lomagne, heute im Département Tarn-et-Garonne; † 12. Januar 1665 in Castres) war ein französischer Mathematiker und Jurist.

⁵² (eigene Darstellung Mi. Felgenhauer 2020).

(eindimensionales) Kontinuum an; er desingularisiert den Wirbel. Heute würden wir vielleicht sagen, Robert Krasny⁵³ beschreibt in der Mitte der 80er Jahre ein (unendliches) kohärentes System. Das Schöne an diesen Differentialgleichungen (und für die von ihnen erzeugten Formen ist dies durchaus auch unter ästhetischen Maßstäben zu behaupten) ist, dass der Grad der Wirbeligkeit vorausbestimmt wird, so dass sich kein- mehr- oder wenig-gängige Formationen erzeugen lassen.

Krasny verwendet zur Geometrieentwicklung der Lundgren-Form einen aus der Wellentheorie stammenden potentialtheoretischen Ansatz. In der Veröffentlichung [Kra-85] kommt man nicht umhin, dabei zuzusehen, wie der Lundgren-Wirbel aus einer linearen Form heraus evolviert. Das Entwicklungsgesetz (dx/dt ; dy/dt) erinnert stark an die auf freie Oberflächen angewandte Wellentheorie, ein potentialtheoretischer Ansatz.

$$X = a_x \varphi R \cos(\varphi)$$

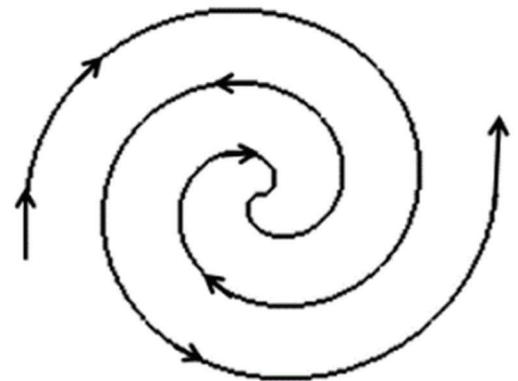
$$Y = a_y \varphi R \sin(\varphi)$$

$$Z = a_z \varphi R$$

für $\varphi: \{2\pi n < \varphi < 0\}$ und $\{0 < \varphi < 2\pi n\}$;

n ist die Windungszahl,

a_x, a_y, a_z sind Skalen.



Das ist in zweierlei Hinsicht beeindruckend, nimmt der Ansatz die Existenz einer (freien) Oberfläche der beschleunigten Kelvin-Helmholtz-Scherschicht zur Grundlage der Betrachtungen und damit spätere computerunterstützte Untersuchungen an (und mit) transienten Wirbelmodellen vorweg. Dieserart entsteht in den frühen 80er Jahren ein abstraktes „parametrisierbares Objekt“, das als numerisches Modell weiteruntersucht werden konnte. Was aber dann

⁵³ [Kra-85] Krasny, R. (1985) Desingularization of Periodic Vortex Sheet Roll-up. Courant Institute of Mathematical Sciences, New York University,

erstaunlicherweise eher wenig geschah und auf diese Weise der Gemeinde der klassischen Wirbelmodelle den Lundgren-Wirbel vor-enthielt. Die zeitliche Entwicklung des Lundgren-Wirbels zeigt Krasny⁵⁴ in [Kra-86].

Mit dem massiven Ausbau der Rechnerkapazitäten in den späten 80er Jahren und der wachsenden (Software-) Verfügbarkeit leistungsstarker Strömungssimulationsverfahren Computational Fluid Dynamics, CFD geraten potentialtheoretische Ansätze mehr und mehr in den Hintergrund. Moffat⁵⁵ (1992) nennt die Lundgren-Formation das endgültige Ergebnis der Kelvin-Helmholtz-Instabilität und zeichnet das Wirbelmodell als eine geschlossen-kohärente Struktur. Wir erkennen nach den (wellentheoretischen) Formeln Krasnys zum Entwicklungsgesetz der Lundgrenwirbel und in den von Moffat zitierten Lundgren-Formationen die Kurve einer Fermat-Spirale⁵⁶. Alleine ihrer eleganten, geometrischen und algorithmischen Erscheinung nach.

Zur Wandelbarkeit der Lundgren-Form möchte ich ganz kurz auf die physikalischen Eigenheiten zirkulationsbehafteter Spiralstrukturen eingehen.

Fluid within Fluid. Was wir heute sehen ist das: Der Wirbel ist nicht länger ein opakes Ding. Wirbel besitzen ein inneres Milieu. Wir bringen den vormals struktural homogenen Wirbel mit einer wirbelig formierten Struktur aus zirkulationsbehafteten Unterstrukturen in Verbindung, die eine eigene, bislang wenig beachtete Lagrange

⁵⁴ $dx_j/dt = (-1/2N) \sum_k^N [\sinh(2\pi(y_j-y_k)) / (\cosh(2\pi(y_j-y_k)) - \cos(2\pi(x_j-x_k)) + \delta^2)]$ $dy_j/dt = (1/2N) \sum_k^N [\sin(2\pi(x_j-x_k)) / (\cosh(2\pi(y_j-y_k)) - \cos(2\pi(x_j-x_k)) + \delta^2)]$

⁵⁵ H.K. Moffat (1992) Spiral structures in turbulent flow. Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, Silver Street, Cambridge, CB39EW

⁵⁶ PIERRE DE FERMAT (* 20. August 1601 Beaumont, † 12. Januar 1665 Castres) französischer Mathematiker. Er begründete neben RENÉ DESCARTES die analytische Geometrie. Des Weiteren arbeitete er auf den Gebieten der Zahlentheorie und war an der Ausarbeitung von Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung beteiligt. Eine besondere Berühmtheit erlangte sein Name im Zusammenhang mit dem sogenannten (großen) Satz von Fermat, dessen Beweis viele Generationen von Mathematikern beschäftigte und erst im Jahre 1994 durch einen britischen Wissenschaftler gelang.

Kohärente Formation ausbilden. Unter den, als „fluidische Regime“ beobachtbaren Phänomenen, werden uns bekannte, aber in diesem Zusammenhang dann doch eher unerwartete physikalische Wechselwirklichkeiten gewahrt, deren explizite Formulierung lohnt.

Treten wir noch einmal einen Schritt zurück. In energetisch wandelbaren Regimen sind auch geometrische Parameter voneinander verschieden. Eng benachbarte Lagrange Kohärente Objekte entwickeln ein Wechselwirkungsgeschehen, das zu unterschiedlichen energetischen Gesamtzuständen führt immer dann, wenn sich die topologiegleiche Gestalt des Systems ändert. Das legen quantitative Untersuchungen in den Schnittebenen eines modellierten Strömungsraums, in dem sich Lagrange Kohärente Objekte befinden, nahe.

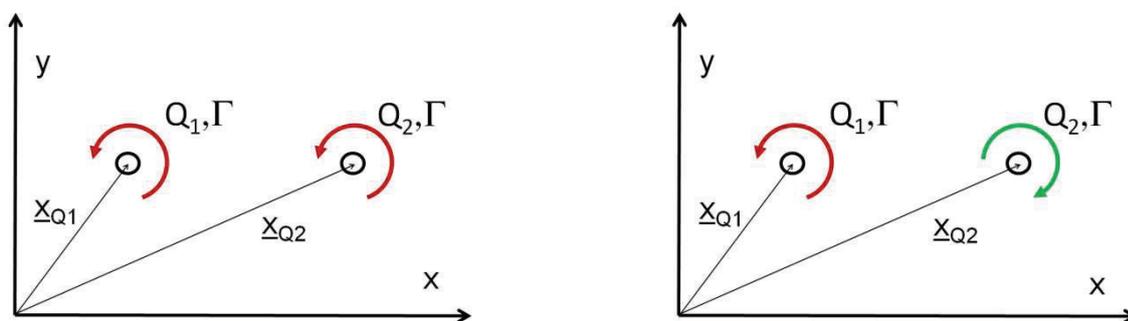


Abb.24: LANG-reichweitige Wechselwirkung zweier Lagrange kohärenter Wirbelfäden in der (x,y) Ebene. Die Zirkulationsrichtung ist gleich (links im Bild). LANG-reichweitige Wechselwirkung zweier Lagrange kohärenter Wirbelfäden in der (x,y) Ebene. Die Zirkulationsrichtung ist verschieden (rechts im Bild).

Dichte Konfigurationen (HD-LCO) führen dort zu mathematisch beschreibbaren Auslöschungen von Induktionswirkungen, weite Konfigurationen (LD-LCO) weichen davon ab und zeichnen einen

höheren verfügbaren energetischen Gehalt der Struktur. Wir wissen an dieser Stelle noch nicht, wie eine Überführung von HD-LCO zu LD-LCO, selbst in einem fingierten abstrakten, synthetischen Szenario, später glaubwürdig zu beschreiben sein wird. Aber so ist das nun mal mit einer sich vor unseren Augen entfaltenden Phänomenologie. Sollte ein HD-zu-LD-Mechanismus existieren, führt er zu eben diesem synthetischen Geschehen.

Betrachten wir also die Wechselwirkung zweier mehr oder weniger benachbarter Lagrange kohärenter Wirbelfäden in der (x,y) -Ebene. Die Orte in der Ebene, von denen die jeweiligen Induktionswirkungen ausgehen sind die Quellpunkte Q_1 und Q_2 . Die Induktionswirkungen der einzelnen Wirbelfäden im Fluid sind, wie oben beschrieben, jeweils richtungsabhängig; außerdem kumulativ. Dies gilt für alle induzierten vektoriellen Geschwindigkeitsanteile v_i im Feld und ableitbaren Größen, etwa den Druckgradienten. Ursache ist die drehrichtungsbehaftete Wirbelstärke Ω bzw. die Zirkulation Γ an einem Quellpunkt. Bei unseren Überlegungen sei die Wirbelstärke vom Betrag konstant.

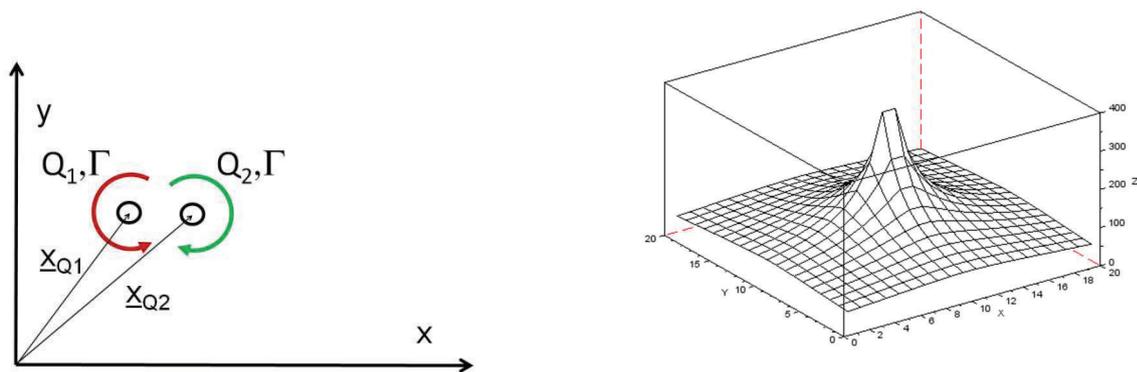


Abb.25: KURZ-reichweitige Wechselwirkung zweier Lagrange kohärenter Wirbelfäden in der (x,y) Ebene. Die Zirkulationsrichtung ist verschieden. Ein Teil der kinetischen Energie $E \sim c^2$ [J] bleibt nicht verwertbar verborgen (Energieäquivalent, rechts im Bild).

Zunächst schieben wir eine wesentliche Einschränkung der Modellvorstellung beiseite: Von zwei Wirbelfäden, die in nicht allzu großer Entfernung von einander mit gleicher Zirkulationsrichtung existieren ist bekannt, dass sie nicht nur das gemeinsame Feld organisieren in dem sie wechselwirken, sondern sich auch gegenseitig in ihrer Bewegung beeinflussen. Stromabwärts beispielsweise fangen richtungsgleich zirkulationsbehaftete Lagrange kohärente Wirbelfäden an, um einander zu drehen. Diese Wechselwirkungseigenschaft sei in unserem Schnittebenenmodell (noch) nicht implementiert.

Es ist sehr einfach, aber durchaus eindrucksvoll, einem Lagrange Kohärenten Objekt in einer Schnittebene beim Wechselwirken zu beobachten. Das Experiment und seine Berechnungsdaten sind einer früheren Untersuchung entnommen⁵⁷. In dieser kurzen Kampagne wurde gezeigt, dass es (selbst in einer lokalen Schnittebene) einen Unterschied macht, in welcher „Form“ das untersuchte LCO daliegt. Es wird das Wechselwirkungsgeschehen mehrerer (3) Quellpunkte an einem Lagrange kohärenten Objekt LCO und ihre Induktionswirkungen untersucht. Wie bereits oben praktiziert sind Impuls-Energie und Leistungsäquivalente Gegenstand der Untersuchung. Das LCO sei im Sinne Helmholtz homogen hinsichtlich der Zirkulationsstärke und von konstanter Zirkulation Γ , welche pfadabhängig in einem euler'schen System positive und negative Werte annimmt.

Drei benachbarte Quellpunkte $Q_1(9,10)$, $Q_2(9,11)$, $Q_3(9,12)$ eines eng gefalteten Lagrange kohärenten Objekts mit der Zirkulation $\Gamma \{+1; -1; +1\}$ organisieren das (sonst rotorfreie) dreidimensionale Strömungsfeld. Wieder betrachten wir ein (Strömungs-) Modell in dem in einer

⁵⁷ [Fel-20] Felgenhauer, M. (2020) Die Verteilung von Induktionswirkungen Lagrange Kohärenter Objekte. Zur Topographie und Kondition von Geschwindigkeitsfeldern. GRIN Verlag, München. ISBN 9783346142146

vorteilhaft angenommenen Schnittebene genau drei Induktionswirkungen registriert werden.

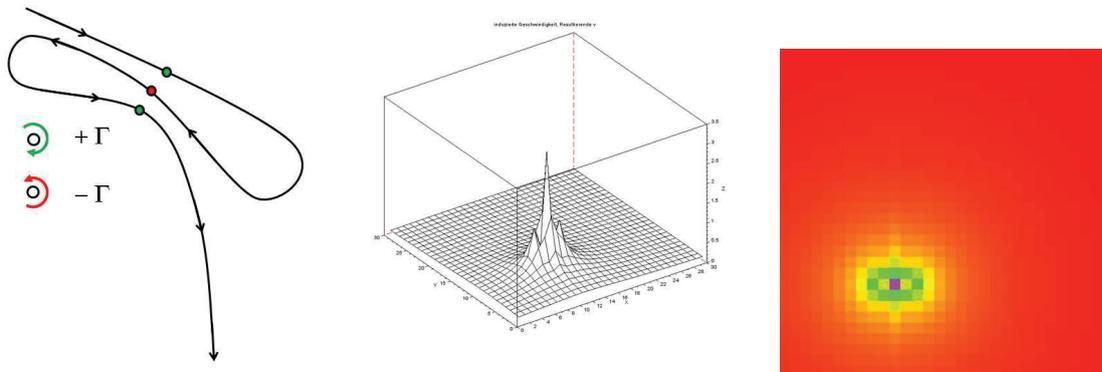


Abb.26: Drei eng benachbarte Quellpunkte eines LCO (links), die resultierende induzierte Geschwindigkeit \underline{v} (mittig und rechts) in einer Schnittebene.

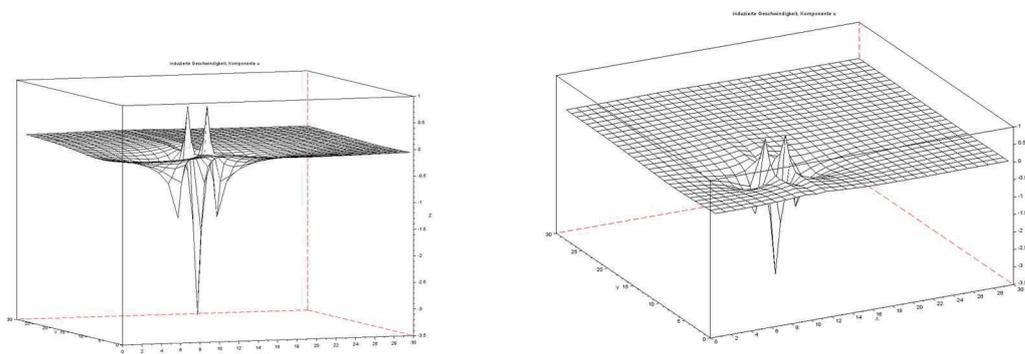


Abb.27: Drei eng benachbarte Quellpunkte eines LCO und die horizontale Komponente u der induzierten Geschwindigkeit in einer Schnittebene in zwei Perspektiven .

Für die kumulierten Komponenten Σu und Σv und die kumulierte Resultierende der induzierten Geschwindigkeit \underline{v} erhalten wir aus dem potentialtheoretischen Modell für nunmehr drei Quellpunkte die Geschwindigkeits-, Impuls und Energie-Äquivalente. Abb. 27. zeigt eine Modellrechnung für die horizontale Komponente u der

induzierten Geschwindigkeit der drei benachbarten Quellpunkte eines LCO und in einer Schnittebene in zwei Perspektiven. .

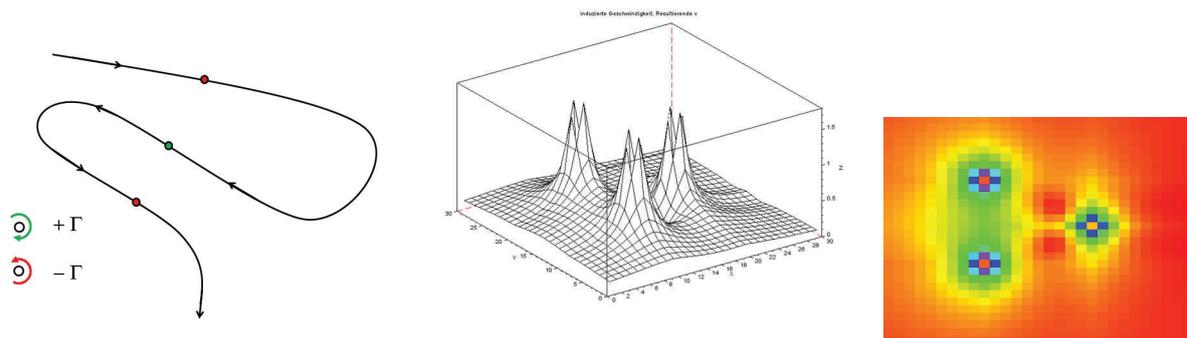


Abb.28: Drei weitreichig benachbarte Quellpunkte eines LCO (links), Resultierende Induzierte Geschwindigkeit \underline{v} (mittig und rechts) in einer Schnittebene.

Die hier erörterte potentialtheoretische Analyse eines synthetischen, dreidimensionalen Strömungsfeldes geht von der Hypothese aus, dass verschiedene Anordnungen gleich vieler Quellpunkte innerhalb einer definierten Systemgrenze unterschiedliche Induktionswirkungen haben. Die Quellpunkte sollen dabei an einem einzigen deformierten Lagrange kohärenten Objekts mit der konstanten Zirkulation $\Gamma \{+1; -1; +1\}$ liegen. Drei eng benachbarte Quellpunkte eines LCO liefern die oben tabellierten Geschwindigkeitsäquivalente. Nun untersuchen wir drei weitreichig benachbarte Quellorte in der Ebene.

Wirbel, Flossen und Kamele

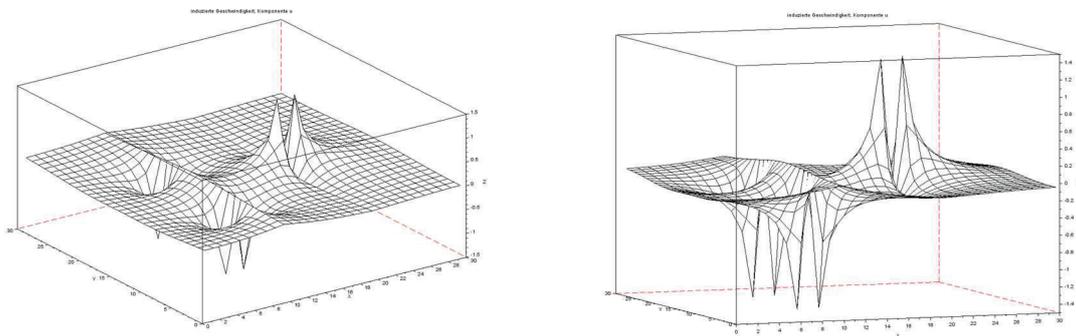


Abb.29: Drei weitreichig benachbarte Quellpunkte eines LCO und die horizontale Komponente u der induzierten Geschwindigkeit in einer Schnittebene und in zwei Perspektiven.

Die Energie ist nicht richtungsabhängig, anders als der pfadabhängige induzierte Impuls \underline{p} und die (Transport-) Leistung L .

<u>Äquivalent</u>	<u>F(c)</u>	<u>physikalische Wirkung</u>	
Impulsmächtigkeit	$\underline{p} \sim c$	[Ns]	67.7%
Kinetische Energie	$E \sim c^2$	[J, Nm]	49.8%
Transportleistung	$L \sim c^3$	[J/s, W]	37.6%

Wir sehen, dass die Richtung der die kinetische Energie induzierenden Geschwindigkeit verschwinden muss immer dann, wenn sie quadratisch in einer Form steht. Die Transportleistung ist dann wieder pfadabhängig (ich persönlich arbeite gerne mit der Impulsbilanz, aber das ist vielleicht nur ein Splien).

Aus der Analyse der Induktionswirkungen dreier Quellpunkte in der Ebene kommen wir zu dem interessanten Ergebnis, dass das verdichtete LCO (HDLCO) nur etwa 2/3 der „Impulsmächtigkeit“ besitzt, dass es im etwas ausgedehnterem Fall nach außen tragen könnte. Es bleiben also 33% der Impulsmächtigkeit des topologisch gleichen Systems verborgen, nur weil ein wenig zusammengerückt ist.

In der Energiebilanz ist es die Hälfte der (theoretisch in der Schnittebene) verfügbaren kinetischen Energie, an Transportleistung bleibt $1/3$ übrig.

Satz: In Abhängigkeit von der Gestalt eines Lagrange Kohärenten Objekts ist der richtungsbehaftete Impuls für topologisch gleiche Strukturen gelegentlich „wirklich“ oder bleibt verborgen.

In unserem kleinen Gedankenspiel, betrachteten wir die zu einer Schlaufe geformte Lagrange Kohärenten Struktur, deren Quellpunkte sich in der Ebene mehr oder weniger nahe begegnen. Ich möchte nun das Simulationsmodell auf ausgedehnte Strukturen anwenden und die Wirbelspirale in der Lundgren-Form als ein Lagrange Kohärentes Objekt behandeln. Natürlich gibt es – ausgehend von einer Grundform – unendlich viele Variationen der Geometrischen Gestalt eines Lundgren Wirbels.

Wir sind auf der Suche nach „deformierten“ Varianten einer kompakten Ausgangskonfiguration des Lundgren-Wirbels. Lineare Streckungen sind natürlich die Langweiler unter allen affinen Transformationen, aber es soll ja an dieser Stelle um „prinzipielle Deformationen“ einer spiraligen Form gehen. Verzerrungen längs der (eulersch'schen) Koordinatenachsen sind niemals besonders elegant, aber gut zu verstehen.

Betrachten wir eine Simulationskampagne über eine Variation der geometrischen Dichte einer Lundgren-Form nach Felgenhauer (2020). In diesem Modell sei die Zirkulation fiktiv $\Gamma=10$ [m^2/s], die Induktionswirkung breitet sich über $\varepsilon=20$ [LE] Längeneinheiten aus. Der Strömungsraum besitzt $8 \cdot 10^3$ Stützstellen. Variiert wird die Streckung der Lundgren-Form, die wir uns wie in Abb.30 skizziert vorstellen

mögen. Wir betrachten zuerst eine hochdichte Struktur und lösen die Geometrie dann sukzessive auf.

Abb.30: Variationen einer ebenen Lundgren-Form. SCHWARZ: Phänomenologie der Fermat-Spirale (D-LCO); ROT: Transformation in X-Richtung (Dehnung, LD-LCO); GRÜN: Transformation in Y-Richtung (Dehnung, LD-LCO); BLAU: Transformation in Y-Richtung (HD, Stauchung). Die Transformierten haben die gleiche Dimension und besitzen in der Ebene gemeinsame Punkte. (Eigene Darstellung Mi. Felgenhauer 2020).

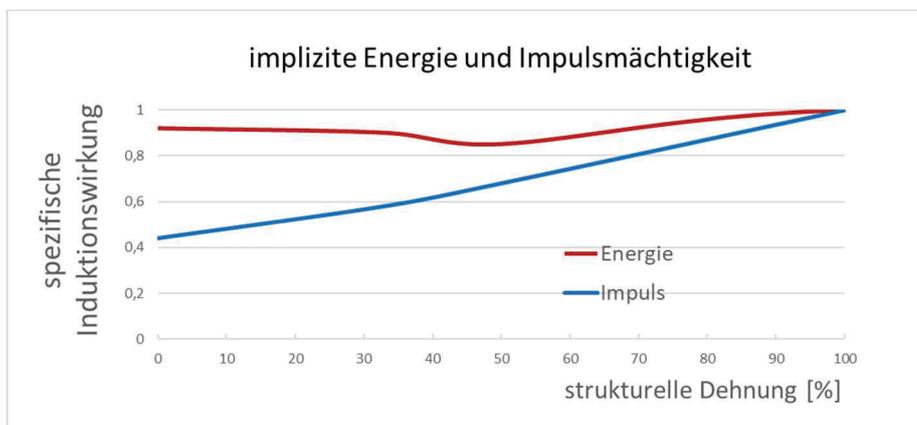
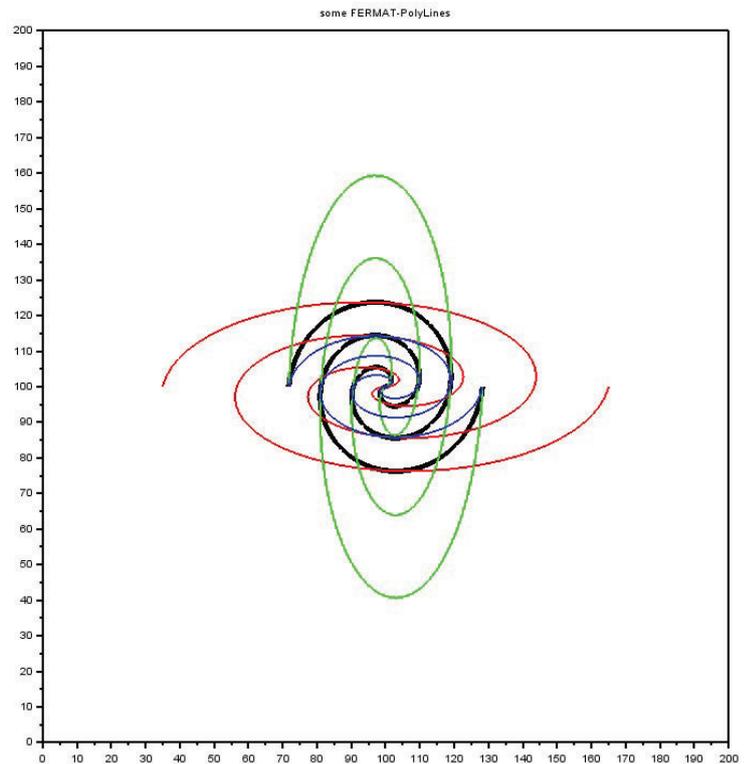


Abb. 31: Spezifische implizite Energie und verfügbare Impulswirksamkeit; aufgetragen über die geometrische Dichte der Struktur.

Natürlich ließe sich die Spiralform weiter expandieren, aber das gab das dreidimensionale Berechnungsgebiet (der Strömungsraum besitzt 200^3 Stützstellen) in dieser Kampagne nicht her. Die gedehnte Struktur bleibt die am höchsten aufgelöste Form der Kampagne. Ich identifiziere sie als in diesem Setting maximale Impulswirksamkeit.

Diskutieren der Kurven. Zunächst einmal wirkt auf mich im Nachgang dieser Kampagne einigermaßen beruhigend, dass das über die gesamte Variation eingebrachte und in die Strömung induzierte (Brutto-) Geschwindigkeits-Äquivalent konstant bleibt. Das als Geschwindigkeit-Brutto der in das Feld induzierten Geschwindigkeit (es werden die euler'schen Komponenten (v_x, v_y)) bleibt konstant.

An der Kurve des spezifischen Energieäquivalent sehen wir eine Abweichung vom Maximalwert bei voller Ausdehnung um zehn bis fünfzehn pph. Links im Diagramm befinden sich die kompakten (HD-LCO) Varianten und ganz rechts die aufgelösten (LD-LCO) Varianten.

Die (rote) Kurve in Abb.31. beschreibt die gesamte im System enthaltene Energie für alle Gestaltkonfigurationen. Das bedeutet, dass jede Spiral-Form bei unterschiedlichen Formen kinetische Energie etwa der gleichen Größenordnung speichert, sofern wir Werte um (+/-) 8% für relativ ähnlich erachten. An dieser Stelle erwähnt werden soll, dass die (kinetische) Energie aus der Sicht eines Lagrangen Betrachters keine bevorzugte (Raum-) Richtung hat, während ein Energie-Wandlungssystem durchaus pfadabhängig sein kann.

Richtungsinvarianz bedeutet nicht, dass (Energie-) Flüsse in Energiebetrachtungen keine positiven oder negativen Vorzeichen besitzen; es bedeutet vielmehr, dass Energiegrößen, die aus Massenbewegungen stammen, das Vorzeichen der (Erzeugenden-) Geschwindigkeiten verlieren.

Egal was passiert, Energie bleibt in einem System erhalten, solange sie nicht „verwandelt“ oder in Reibung aufgezehrt wird, was ja auch eine

besondere Art der Verwandlung (in Wärme) ist oder über die systemgrenze verschoben wird. Die Energie „steckt“ als im Spiralsystem: sie existiert in der einen (HD-LCO, links im Bild) Gestalt und ebenso in der anderen (LD-LCO, rechts im Bild)- Gestalt.

Während die im System gespeicherte Energie auf etwa gleichem Niveau bleibt, sehen wir bei der Kurve der (spezifischen) und aus dem System „abrufbaren“ Impulswirksamkeit einen ansteigenden Kurvenverlauf (die blaue Kurve im Diagramm Abb.32.) In der kompakten (HD-LCO) Konfiguration kann nur etwa 40% der theoretisch verfügbaren Impulswirkung aus der vorhandenen Energie der „entfalteten“ Geometrie der Spirale abgerufen werden. Genau wie die kinetische Energie ist die Impulswirksamkeit im System enthalten, aber sie „steckt fest“ und bleibt der Umgebung verborgen. In der Natur ist dieser Energie speichernde Zustand bevorzugt.

Erst wenn jemand die kompakte Lundgren-Form sprichwörtlich „vermasselt“⁵⁸ wird die Energie verfügbar. Dieser Jemand, dieses Etwas muss die Struktur dehnen, verformen, auflösen, kommen um an die Energie heranzukommen. Im intakten, nicht deformierten System bleibt die „implizite Energie“ die ganze Zeit im System enthalten.

Ich sprach über die richtungsinvariante Energie. Für den körperfesten Lagrange-Betrachter hat im Gegensatz dazu der Impuls eine nicht-invariante (vom Pfad abhängige) Richtung, was immer auch aus dieser Argumentation folgen mag.

Die Phänomenologie geht „stillschweigend“ davon aus, dass die kompakte Variante (HD-LCO) links im Diagramm und in Abb. 30: die blaue und auch noch die schwarze Spiralkurve, stabil sei. Es ist der

⁵⁸ Vermasseln: etwas, was einen anderen betrifft, unabsichtlich oder in böser Absicht zunichtemachen oder verderben; aus dem Jiddischen (hebr. Masel: „Schicksal, Glück“)

bevorzugte Zustand des Spiralsystems. Ein Attraktor⁵⁹. Genau dieses Gebaren wird in der Realität beobachtet.

Ich vermute, dass bei Strömungsgebilden bestimmter geometrischer und energetischer Qualität diese Stabilität von einem „selbstreferentiellen Regime“ der Geschwindigkeitsinduktion herrührt. Die Modelluntersuchungen an Lundgren-Formen legen (mir) den Verdacht nahe, dass eine (normale) spiralige Form alleine nicht ausreicht, einen Attraktor auszubilden. Im Gegenteil. Wir haben oben am Beispiel der konzentrischen Wirbelspulen gesehen, dass deren Impulswirksamkeit „fluktuativ“ ist und wenig wirksam, sobald der beschleunigte Fluidmassenstrom die Nähe zum Erzeugensystem verliert.

Von Wirbelgebilden, die auf offener See und von sehr großen Schiffen generiert werden weiß man, dass ihre Lebensdauer nicht nur Stunden und Tage, sondern bis zu vier Wochen betragen kann. Karmansche Wirbelstrassen, die aus der Anströmung einer Boje in der Flussmitte (oder einer Fahrrinnenbegrenzungstonne) stammen, bleiben über hunderte von Metern an der Phasengrenze sichtbar. Woher also die enorme Resilienz und Formstabilität der spiraligen Struktur? Und was bedeutet in diesem Zusammenhang ein selbstreferentielles Regime? Nach Bernoulli nimmt der Druck in einem Gebiet im Feld mit zunehmender Geschwindigkeitsinduktion durch das Lagrange Kohärente Objekt ab! Wir könnten alles bisher über die Geschwindigkeitsinduktion von Lagrange Kohärenten Objekten gesagte, auch aus der Sicht des Druckgradienten erzählen.

⁵⁹ Attraktor (lat. ad trahere „zu sich hin ziehen“) ist ein Begriff aus der Theorie dynamischer Systeme und beschreibt eine Untermenge eines Phasenraums (d. h. eine gewisse Anzahl von Zuständen), auf die sich ein dynamisches System im Laufe der Zeit zubewegt und die unter der Dynamik dieses Systems nicht mehr verlassen wird. Das heißt, eine Menge von Variablen nähert sich im Laufe der Zeit (asymptotisch) einem bestimmten Wert, einer Kurve oder etwas Komplexerem und bleibt dann im weiteren Zeitverlauf in der Nähe dieses Attraktors (wikipedia)

Nach der Potentialtheorie sind die pfadabhängigen Induktionswirkungen eines zirkulationsbehafteten Lagrange Kohärenten Objekts zunächst die in dessen Umgebung im Feld induzierten Druckgradienten. Der induzierte Druck ist konservativ und superponierbar und (im Gegensatz zur extensiven Geschwindigkeit) als physikalische Größe intensiv⁶⁰. In fluidischen Räumen mit definierten Systemgrenzen ist der Druck bilanzierbar und beispielsweise in den Schnittebenen als Isobarengraphik darstellbar. Diverse Quellen Q entlang eines LCO induzieren in deren Umgebung in allen Aufpunkten A partielle Druckbeiträge, die zu einem graduellen Gesamtdruckgeschehen kumulieren.

Ich stelle mir nun vor, im Strömungsfeld ereigne sich nun Folgendes: der induzierte Druckgradient bildet ein räumliches Gelände aus und in gleicher Weise wie Geschwindigkeiten im fluidischen Raum mit Objekten ebendort wechselwirken, tut dies auch der Druck. Wenn wir nun das Lagrange Kohärente Objekt behandeln wie einen „Körper“ im Strömungsraum (Fluid within a Fluid), dann führen die „Fluid-Struktur-Wechselwirkungen“ dazu, dass die Struktur förmlich in der „Drucksenke gefangen“ bleibt. Dieser Gedankengang könnte die enorme Stabilität von Wirbelstrukturen in der beobachtbaren Natur erklären. Leider ist mir eine derartige „Formulierung“ bislang nicht begegnet und irgendwas sträubt sich noch in mir, in dieser Angelegenheit der Erste sein zu wollen. Also verwende ich in dieser Kampagne noch kein phänomenologisches Modell für dieses Wechselwirkungsgeschehen. Eine Hypothese für die in der Natur bevorzugte Kompaktheit, Stabilität und Resilienz spiraliger Strukturen vom Lundgren-Typ steht also noch aus.

⁶⁰ Eine intensive Größe ist eine Zustandsgröße, die sich bei unterschiedlicher Größe des betrachteten Systems *nicht* ändert. Man unterscheidet hierbei systemeigene intensive Größen, wie beispielsweise Temperatur und Druck, und stoffeigene intensive Größen, wie alle molaren und spezifischen Größen reiner Stoffe.^[1] Das Gegenstück zu den intensiven Größen sind die extensiven Größen, wie beispielsweise Teilchenzahl, Volumen, Energie und Entropie, welche sich mit der Größe des Systems ändern (Skalierung).

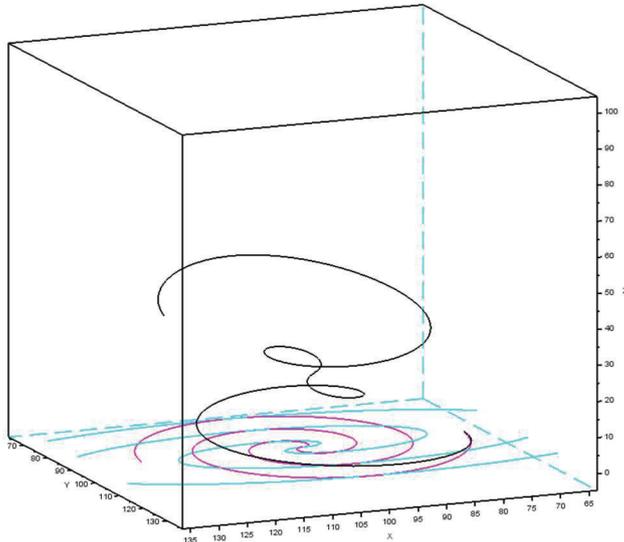


Abb.32: Homomorphe Variationen der Lundgren-Form. Die Transformierten haben gleiche Dimension. (eigene Darstellung Mi. Felgenhauer 2020).

Die oben in Abb.30. dargestellten, einfachen Geometrietransformationen sind Streckungen entlang der euler'schen Koordinatenachsen in der (X-Y)-Ebene. Mit dem eingesetzten Modell ist das energetische Gebaren in einer Ebene gut zu bilanzieren, die Simulationsergebnisse, beispielsweise die Gradientenfelder der Komponenten der induzierten Geschwindigkeiten, in anschaulichen Graphiken schön anzusehen und die Induktionswirkungen sind verständlich zu kommunizieren. In der bösen Realität werden einem Lagrange Kohärenten System (natürlich) ganz andere Transformationen zuteil (Abb.32). Davon wird noch die Rede sein.

Pectoral

Und dann passierte etwas Wunderbares. Ich befinde mich wieder auf dem Zeitstrahl irgendwann im Jahre 2017. Und untersuche das Schwimmverhalten des Kolbenwasserkäfers. Dieser kleine Bursche ist wirklich ein fluidmechanisches Unikum. Er kann krabbeln, fliegen, schwimmen und tauchen, vor allem aber kann er „surfen“⁶¹. Ein Forscher von der Universität Düsseldorf wird auf die Forschung über die Wasserkäfer aufmerksam und schreibt einen netten Brief. Nach einem kurzen, intensiven Informationsaustausch wird deutlich, dass man sich zwar durchaus für die sehr spezielle Fluidmechanik dieses Wunderwesens (er kann surfen!) interessiert, aber die rezenten Interessen dort gar nicht so sehr auf Insekten, sondern auf das Jagtverhalten kleiner Hechte konzentrieren. Sehr kleiner Hechte.



Abb.33: Der Halbschnabelhecht (*Dermogenys pusilla*) ist ein Fisch aus der Familie Zenarchopteridae. Eher gelassen im Kraut (links) und nahe an der Wasseroberfläche auf Beute lauend (rechts im Bild). In freundlicher Überlassung, Aquazoo Löbbecke Museum Düsseldorf.

Mit großer Freude folge ich einer herzlichen Einladung zum Aquazoo Löbbecke Museum Düsseldorf und lerne dort den berühmten und sehr

⁶¹ Dienst, Mi. (2018) LANGSAMSURFEN. Eine fluidmechanische Phänomenologie und die RAIL-FIN-INTEGRATION bei Wasserkäfern, GRIN-Verlag GmbH München, ISBN (e-Book): 9783668691230, ISBN(Buch): 9783668691247

netten Professor Greven kennen, der mir die aktuellen Forschungsfragen seiner Arbeitsgruppe in einer auch für zoologische Laien lesbaren Form darlegt. Im Aquazoo gelingen mir sogar Filmaufnahmen des jagenden Halbschnabelhechtes. Er ist etwa 5 Zentimeter lang und stellt Beute von der Größenordnung einer Fruchtfliege nach, alles svery tiny! Und er ist pfeilschnell. Zurück in Berlin nimmt ein wunderbarer wissenschaftlicher Dialog rasant Fahrt auf.

Ich möchte (obwohl ich das natürlich so gerne täte) an dieser Stelle nicht auf die Inhalte der Kooperation eingehen, nur auf ein sehr interessantes Zwischenergebnis (bekanntlich gibt es in der Forschung ja keine Endergebnisse). Schnabelhechte orten ihre Beute aus den visuellen Signalen einer Oberflächenwelle, die ein zappelndes Insekt erzeugt. Dies ist Stand der Wissenschaft. Auch, dass ein neuronal raffiniert verschaltetes Sensorsystem auf der der Wasseroberfläche zugewandten Seite des Schnabels des kleinen Hechtes die Richtung der Beute ermittelt. Mit einem potential-theoretischen Ansatz konnte gezeigt werden, dass der geometrisch sehr kleine Wellenzug, den die Beute erzeugt, es handelt sich um eine „aperiodische Kapillarwelle“, Impulswirkungen in seinem Orbitalssystem enthält, die derart intensiv sind, dass sie von dem kleinen Fisch zum Voranschnellen in Richtung Beute genutzt werden können⁶².

Das Beschleunigungsgebaren des Fisches enthält eben auch passive Anteile und der Hecht nutzt offenbar die horizontalen Anteile der Orbitalbewegung der Kapillarwelle dazu, um in die Richtung der Beute voranzuschnellen.

⁶² [Fel 19-8] Felgenhauer, Mi. (2019) Reihenuntersuchung an Modellen kleiner aperiodischer Wellen. Zur Strömungswirklichkeit synthetischer Wasserwellen. GRIN-Verlag GmbH München, Anr.: v 470097. ISBN(e-Book) 9783668948730, ISBN(Buch): 9783668948747

[Fel 19-7] Felgenhauer, Mi. (2019) Modell kleiner aperiodischer Wellen. Zur Strömungswirklichkeit synthetischer Wasserwellen. GRIN-Verlag GmbH München, Knr.: v469314. ISBN(e-Book) 9783668931510, ISBN(Buch): 9783668931527

Als entscheidend für die Impuls-Adaption wird das „Pectoral-Flossen-System“ des Fisches identifiziert. Es ist die Pectoralflosse des Schnabelhechtes, die die aus der Orbitalbewegung der kleinen aperiodischen Welle stammende Geschwindigkeitskomponente in eine Vorwärtsbewegung verwandelt. Für Zoologen ist dieser „passive Anteil“ beim Energietransfer aus einer Fluidbewegung (Orbitalbewegung) in das Voranschwimmen des kleinen Lebewesens ein erstaunliches Geschehen.

Die Pectoralflossen sind quasi die „Hände“ eines Fisches. Wenn ich an dieser Stelle die Zeitstrahl-Metapher noch einmal bemühen darf, dann deshalb, weil ich schon damals jenes kleine Puzzelsteinchen in den Händen (in der Flosse) hielt, das aus heutiger Sicht eine Phänomenologie des Impulstransfers aus Wirbelstrukturen motiviert. Ohne es zu wissen. Wir könnten jetzt Foucault zitieren!

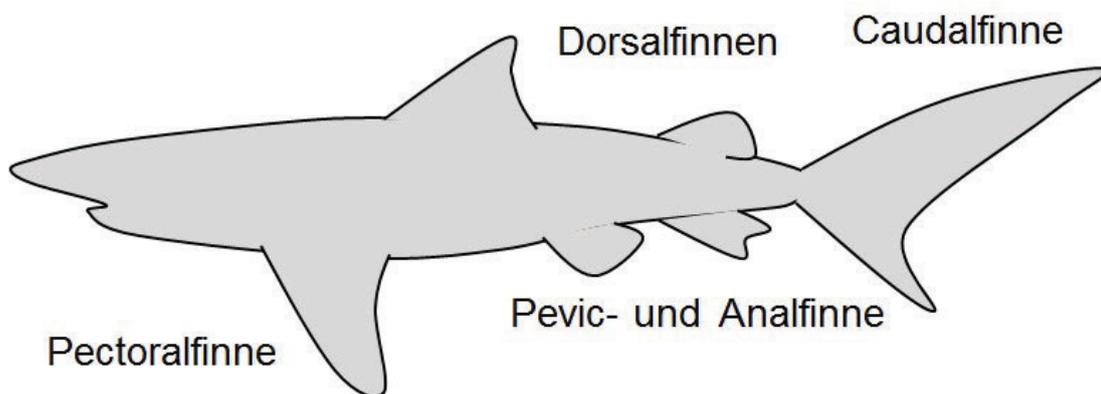
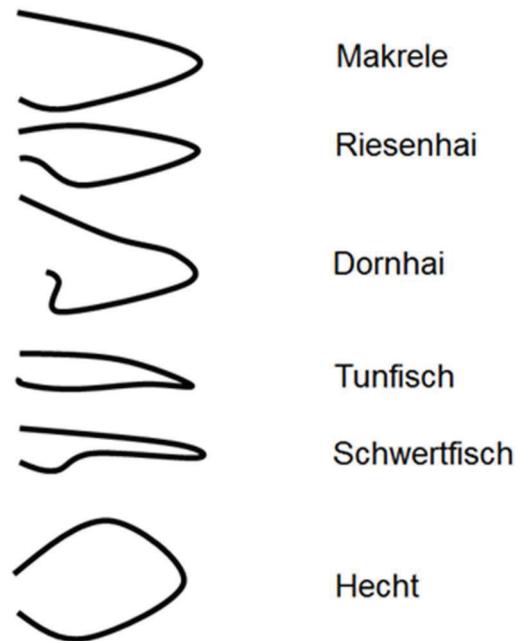


Abb.34: Flossensysteme eines Knorpelfisches. Der Pectoralflosse, ihr entspricht die „Wirbeltierhand“, werden in erster Linie steuernde und stabilisierende Aufgaben zugeschrieben.

Sichten wir die einschlägige zoologische Literatur, werden wir zum Thema „Pectoral-Flossensystem“ in erster Linie die fluidmechanischen Aufgaben und Eigenschaften hinsichtlich der Steuerung und der Kursstabilität des Fisches beschrieben vorfinden.

Unter den Flossen- und Finnensystemen der Fische, Amphibien und Meeressäuger bildet die Pectoralfinne den größten Umfang fluidmechanisch wirksamer Szenarien ab.

Abb.35:
Formensprache der Pectoralfinnen.



Die Funktions- und Formensprache der Pectoralfinnen ist extrem vielfältig. Ich stelle mir vor: einem naiven Ingenieur würde die Entwicklungsaufgabe gestellt: „Digging the Energy“ und ihm würde ein Bildchen vom Typ Abb. 35. vorgelegt. Für welche Finne würde er sich wohl entscheiden?

Zum Glück interessiert sich niemand für die Antwort auf diese Frage, aber: Betrachten wir die planare Kontur einiger Brustflossen in skaleninvarianter Darstellung (Abb.35), entsteht ein polarisierendes Bild, aus dem sich genau eine prinzipielle Form extrahieren lässt. Die Achsenbeweglichkeit der Pectoralfinne deckt alle vier räumlichen Quadranten

ab und schließt Rotation und Ondulation mit ein. Dazu kommen die Fluid-Struktur-Wechselwirkungen einer schlagenden Finne, die in der Nähe einer begrenzenden Wand, dem Fischkörper, betrieben wird; leider ist das ein schlecht beziehungsweise überhaupt nicht untersuchtes Strömungsgeschehen.

Gestaltvielfalt, Formensprache, Rotation, Ondulation der Pectoralfinne und die Strömungsphänomene in Wandnähe legen eine experimentelle Untersuchung des Biosystems im Vorfeld irgendwelcher Modellierungen, insbesondere vor dem Hintergrund einer Übertragung auf Technik nahe. Die Biosystemanalyse zeigt sich bei derart komplexen Fragestellungen als eine Forschung, die Nichtnaturwissenschaftler instrumentell und strukturell verschlossen bleibt und Ingenieuren lediglich die Rolle des Zaungastes zuweist. Aber gut, sagen wir mal: so richtig „schaufeln“ kann eigentlich nur das System Hecht, oder? „Digging the Energy“, warum auch nicht?

Stabilisieren, Steuern, Manövrieren? Die gemeine Wirbeltier-Brustflosse kann mehr. Viel mehr. Die Pectoralflosse einer Forelle beispielsweise – wir haben hier leider kein Pictogram -, könnte auf ihre unmittelbare fluidische Umgebung „destruktiv arbeiten und zerstörend wirken“. Patsch!

Dies und anderes ging mir damals durch den Kopf. Es war an der Zeit, noch einmal hervorzudröseln, worauf die Rede der vorangegangenen Argumentation zielt, was wir hier eigentlich tun.

Eingangs gingen wir der Frage nach, wie und auf welche Weise Fische im Fluid enthaltene Wirbel nutzen, um beim Voranschwimmen Antriebskraft zu einzusparen. Bei den untersuchten Wirbelstrukturen handelte es sich um die von Karman beschriebenen hufeisenförmigen Wirbelstraßen im Nachlauf einer „Störung in der Strömung.“

Wirbel, Wirbelstraße und Wirbelelemente der Wirbelstraße erscheinen nicht immer in reiner, klassischer Gestalt und Schönheit vor unserem simulationsverwöhntem Wahrnehmungsapparat.

Es gibt natürliche Wirbel in natürlichen Strömungen. Es gibt intakte und deformierte Strukturen, Halbes, Unvollständiges, Unbrauchbares. Ganz offenbar ist nicht alles, was den Ort einer Störung in der Strömung passiert und stromabwärts davonschwimmt, für energieräubernde Lebewesen energetisch attraktiv. Deformierte oder nicht vollständige Wirbelsysteme oder valide Wirbelstrukturen, von denen Nichtfische vielleicht glauben, dass sie energetisch wertig seien, ziehen an uns und am Fisch, vorbei.

Oder auch nicht. Aus Beobachtungen dieses prozessualen Zusammenhangs, aus Berechnungen und aus Experimenten Anderer, aus der Anschauung der Natur und aus Simulationen wissen wir, dass der Fisch entweder einen Teil der in einer Wirbelstruktur enthaltene Energie entnimmt, um sie beim Bergaufschwimmen für die eigene Bewegung und damit das Schwimmen gegen die Hauptströmungsrichtung einzusetzen oder wenn er (der Fisch) deformierte, nichtvollständige Wirbelsysteme vorfindet, dass er diese (einfach) repariert, oder ergänzt. Das zwölfte Kamel? Ist es nicht genau dieses fluidmechanische Phänomen, das diesen Aufsatz motiviert? Die Modelle, die Numerik, die Simulationen? All der Aufwand?

Nein. In der realen Strömung kommt es zu einem vom Tier inszenierten Vorgang, bei dem das fluidische Wirbelsystem vervollständigt und damit instandgesetzt und zu einem wirkmächtigen Energieaustausch befähigt wird. Es kann heute gezeigt werden dass, wenn der Fisch deformierte, nichtvollständige Wirbelsysteme vorfindet und ein „selbstgemachtes“ fluidmechanisches Komplement den Energieübergang überhaupt erst ermöglicht. Das schier unglaubliche aber ist, dass

dieser Vorgang passive Anteile enthält, also in einem gewissen Maß autoadaptiv abläuft und außerdem katalytische Elemente „bei Bedarf“ vom Lebewesen dem Fisch selbst in den Prozess eingestreut werden können. Als für den Fisch energetisch attraktiv werden jene hufeisenförmigen Wirbelsysteme der Karman'schen Wirbelstraße identifiziert, die aus zwei entgegengerehenden walzenförmigen Wirbeln bestehen, welche selbst über einen geschwungenen „Riegel“ miteinander in Verbindung stehen. Die Struktur des Wirbelsystems stammt aus einer Oszillation im Nachlauf der Strömung um eine Störkontur flußaufwärts!

Nachdem wir mit tradierten Wirbelmodellen das Geheimnis der Energieübertragung nicht entschlüsseln und die belastungsadaptive Fluid-zu-Fisch-Wechselwirkung nicht ausreichend sauber beschreiben konnten, wandten wir uns zunächst der Frage zu, was der Fisch überhaupt „sieht“, wenn ihn auf dem Weg zur Quelle und nach der realen Anströmung eines der vielen Hindernisse, stromabwärts ein graduell verzerrtes und nichthomogenes Wirbelsystem begegnet. Ein Wirbelsystem das er vielleicht trotz der Versehrtheit dieser Struktur energetisch abweiden möchte.

Sodann wurde es komplizierter und nicht einfacher. Der Fisch, sein Strömungssinnesorgan, ja vielleicht sein zur passiven Fluid-Struktur-Wechselwirkung befähigter Körper „reagiert“ auf ein Wirbel-Struktur-System. Aber was ist das wirklich, was er, der Fisch, sein Körper, sieht?

Aus zahlreichen Untersuchungen ist bekannt, dass Seeotter, Semi-Aquatiaten andere landlebende Säugetiere, die gelegentlich das Wasser aufsuchen um zu jagen, die Wirbelspur ihrer Beute über sehr weite Strecken und vergleichsweise langer Verweilzeit der Wirbelstruktur außerordentlich präzise nachverfolgen können. Selbst in unsichtiger Umgebung. Die Kunst der „blinden“ Unterwasserjagt besteht hauptsächlich darin, mittels zu speziellen „Strömungshaaren“

ausgebildeten Vibrissen⁶³ (whisker) die Wirbelspur ahnungsloser Fische zu „lesen“. Bei fluidischer Beaufschlagung durch Wirbel reagieren die Whisker mit einer ruckartigen Bewegung, analog zur Stick-Slip-Reaktion⁶⁴ von Ratten-Whiskern; diese Bewegung ist die zeitliche Ableitung der Gaußschen Funktion, die man sich wie den S-Schlag einer Sinuskurve vorstellen darf. Diese als „Vortex-Trackig“ bekannten Verfahren sind wie viele biologische Mustererkennungsmethoden⁶⁵ sehr effizient. Interessanterweise besitzen auch Fische als „Strömungshaare“ bezeichnete (Strömungs-) Sinnesorgane. Wir sind ihnen oben als Druckdetektoren auf den Nasen von Halbschnabelhechten begegnet.

Ebenfalls durch die biologische Evolution bis auf das physikalisch Machbare optimiert und ausgereift, ist das so genannte Strömungsinnesorgan der Fische. Manche Seitenlinienorgane sind derart feinfühlig, dass sie teilweise sogar zur geomagnetischen Navigation benutzt werden. Wandernde Fische können sich so am Erdmagnetfeld orientieren. Bis heute geht die vorherrschende Lehrmeinung davon aus, dass der primäre Mechanismus der fluidischen Energieentkopplung bei Fischen auf Wahrnehmungsleistungen der Strömungsgeschwindigkeitsgradienten durch das Seitenlinienorgan und anschließenden weiterverarbeitenden kognitiven Prozessen beruht⁶⁶.

⁶³ Vibrissen, auch Sinus-, Fühl-, Tast- oder Schnurrhaare genannt (lateinisch vibrissa, Plural vibrissae), sind spezielle Haare, die vielen Säugetieren zumeist im Gesicht wachsen. Sie sind dicker, fester und länger als gewöhnliche Haare und auf die Wahrnehmung taktiler Reize spezialisiert. (wikipedia)

⁶⁴ Stick-Slip-Effekt (von engl. *stick* ‚haften‘ und *slip* ‚gleiten‘) oder auch Haftgleiteffekt oder (selbsterregte) Reibschwingung bezeichnet das Ruckgleiten von gegeneinander bewegten Festkörpern. Bekannte Beispiele sind die Tonerzeugung bei Streichinstrumenten, das Zirpen von Insekten, das Quietschen von Wandtafeln, knarrende Türen, quietschende Bremsen oder Reifen.

⁶⁵ Felgenhauer, Mi. (2019) BIONIK UND DIGITALE BILDVERARBEITUNG, Laterale Inhibition und Aktivierung. ISBN(e-Book) 9783668874541, ISBN(Buch): 9783668874558

⁶⁶ James C. Liao (2004) Neuromuscular control of trout swimming in a vortex street: implications for energy economy during the Kármán gait Department of Organismic and Evolutionary Biology, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA

Siehe auch: George V. Lauder. Professor of Biology, Harvard College Professor, Henry Bryant Bigelow Professor of Ichthyology, Curator of Ichthyology in the Museum of Comparative Zoology

Weitere unter: <http://www.people.fas.harvard.edu/~glauder/download.htm>

Wir wissen heute, dass der Energieentkopplungsprozess passive Anteile enthält⁶⁷. Die nachfolgend angestellten Vermutungen werden widerspruchsarm beiderlei Elemente enthalten.

Gehen wir von einem Wahrnehmungsphänomen bei oder im Vorfeld der Energieentkopplung aus und betrachten das Geschehen nun einmal nicht von der Empfängerseite aus (Fisch), sondern seitens der Anbieterin eines fluidischen Musters, der Strömung.

Lagrange Kohärente Objekte, Systeme und Strukturen bilden dort, wo sie im Fluid auftauchen, Strömungsphänomene aus, die einstweilen bizarr anmuten. Gleichsam motivieren diese in der Natur beobachtbaren Phänomene das Interesse experimenteller, analytischer und theoretischer Forschung.

Gegenwärtig zielen die Untersuchungen über LCS in erster Linie auf deren Identifizierung in ansonsten entropisch, homogenen fluidischen Szenarien. Zur Konturextraktion und Kantenverfolgung werden digitale, bildverarbeitende Methoden entwickelt und computerbasierte Verfahren eingesetzt. Neben der Detektion und Analyse von LCS in natürlichen Strömungen und in synthetischen Simulationsmodellen⁶⁸ kommt der Erforschung ihrer generischen Potenz der Muster- und Strukturzeugung in der benachbarten Strömung zunehmend Bedeutung zu. Wir gehen in unserer Untersuchung davon aus, dass ..

⁶⁷ [Vos-15-2]M. Voß, H.-D. Kleinschrodt, M. Dienst: "Experimentelle und numerische Untersuchung der Fluid-Struktur-Interaktion flexibler Tragflügelprofile", Resarch Day 2015 - Stadt der Zukunft Tagungsband - 21.04.2015, Mensch und Buch Verlag Berlin, S. 180- 184, Hrsg.: M. Gross, S. von Klinski, Beuth Hochschule für Technik Berlin 2015, ISBN:978-3-86387-595-4

[Vos-15-1]M. Voss, P.U. Thamsen, H.-D. Kleinschrodt, M. Dienst (2015): "Experimeltal and numerical investigation on fluid-structure-interaction of auto-adaptive flexible foils", Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'15), Budapest, Ungarn, 1.-4. September 2015, ISBN (Buch): 978-963-313-190-9.

⁶⁸ Felgenhauer, Mi. (2019) BIONIK UND DIGITALE BILDVERARBEITUNG, Laterale Inhibition und Aktivierung. ISBN(e-Book) 9783668874541, ISBN(Buch): 9783668874558

- Lagrange Kohärente Objekte ihre fluidische Umgebung durch Induktionswechselwirkungen organisieren⁶⁹.
- LCS eine erstaunliche topologische Stabilität besitzen.
- Spiralige LCO kinetische Energie enthalten und
- diese Energie reversibel gespeichert wird;
- Ein Lagrange Kohärentes Objekt ästhetische Qualitäten besitzt: es ist „wahrnehmbar“.

Dennoch bleibt bislang schlecht untersucht, auf welche Weise das fluidmechanische Phänomen des Lagrange Kohärenten Objektes von einem Lebewesen wahrgenommen wird. Auch wir werden hier diese Aufgabe nicht anfassen, die Frage nicht klären wollen. Es wird also in den folgenden Zeilen lediglich um Voraussetzungen einer Wahrnehmbarkeit eines Strömungssignals, eines Strömungsmusters gehen.

Eine erst kürzlich abgeschlossene Untersuchung ging der Frage nach, ob ein synthetisches, spiralisches Lagrange Kohärentes Objekt eine „fraktale Natur“ besitzt und mit dieser Eigenschaft eine (wenn auch theoretische) physikalische Wechselwirklichkeit korreliert.

Natürlichen Mustern und Signalen liegen hinsichtlich ihrer Entstehung nur eine begrenzte Anzahl generischer Prinzipien⁷⁰ zu Grunde. Mehr noch: selbst dissipative und Entropie vermehrende Prozesse verweisen auf das konservative Prinzip, bei dem ein System in letzter Konsequenz einem Minimum an innerer Energie zustrebt. Es gibt aus meiner Sicht, guten Grund zu der Annahme, dass Muster in Fluiden mit Eigenschaftsgradienten einhergehen immer dann, wenn wir von einem „Einstoff-System“ ausgehen wollen.

⁶⁹ Felgenhauer, Mi. (2020). Die Verteilung von Induktionswirkungen Lagrange Kohärenter Objekte. Zur Topographie und Kondition von Geschwindigkeitsfeldern. GRIN-Verlag, München.

⁷⁰ Generisch (von lateinisch genus, gener-is „Geschlecht, Gattung“) ist die Eigenschaft eines materiellen oder abstrakten Objekts, insbesondere einer Bezeichnung, nicht auf etwas Spezifisches, also auf unterscheidende Eigenheiten Bezug zu nehmen, sondern im Gegenteil sich auf eine ganze Klasse, Gattung oder Menge anwenden zu lassen oder eine solche gleichsam hervorzubringen oder stellvertretend dafür zu stehen.

„Fluid within a Fluid“ muss dann aber bedeuten, dass bei gleicher und einheitlicher Materie (irgend-) etwas Dynamisches das ansonsten homogene Fluid mit begrenzenden Oberflächen ausstattet. Wir hatten diese dynamische Oberfläche als Scherschicht identifiziert. Ein dieserart begrenztes und in einer Art turbulenten Haut gefangenes Innenmilieu wird im Strömungsraum eine gewisse Gestalt annehmen. Lagrange Kohärenz verweist auf die Implikation eines richtungs- und pfadabhängigen inneren Milieus. Diese tensorale Eigenschaft des inneren Milieus ist wesentlich für Lagrange Kohärente Systeme. Wesentlich ist aber auch, welcher Gestalt ein fadenförmiges Objekt ist.

Prinzipiell könnte nach der oben eingebrachten Definition im Sinne Helmholtz, ein „ordentliches“ eindimensionales Lagrange Kohärentes Objekt „beliebig“ geformt sein, wenn es nur von konstanter Wirbelstärke, überschneidungsfrei und vom „Geschlecht 1“ ist.

Euklid beschränkt sich in Hinblick auf Dimensionen von Geometrien auf (mathematische) Mengen, die in der Literatur als dimensional kordante (gleichförmig zu einander angeordnete) Mengen bezeichnet werden können. Die Euklidische Dimensionen- Theorie lässt aber keine Möglichkeit zu, dass Dimensionen nicht alleine ganzzahlig, sondern auch gebrochen sein können und eine Mantisse besitzen, also keine Rationalen Zahlen sind. Dieser oder ein sehr verwandter Umstand brachte den Benoit Mandelbrot⁷¹ dazu, den Begriff „Fraktal“ zu prägen und wie folgt zu definieren:

Ein Fraktal ist nach Definition eine Menge, deren Hausdorff-Besicovitch-Dimension echt die topologische Dimension übersteigt⁷².

⁷¹ Benoît B. Mandelbrot (* 20. November 1924 in Warschau; † 14. Oktober 2010 in Cambridge, Massachusetts) war ein französisch-US-amerikanischer Mathematiker. Er leistete Beiträge zu einem breiten Spektrum mathematischer Probleme, einschließlich der theoretischen Physik, der Finanzmathematik und der Chaosforschung. Am bekanntesten aber wurde er als Vater der fraktalen Geometrie (wikipedia).

⁷² Benoit B. Mandelbrot ((1987) Die fraktale Geometrie der Natur. Birkhäuser Verlag Basel, S.27.

Auf den von Felix Hausdorff eingeführte Dimensionenbegriff, der beliebigen metrischen Räumen rationale Zahlen zu ordnet, möchte ich an dieser Stelle nicht eingehen, lediglich auf dessen Potenz, „ordentlichen“ ebenen und räumlichen Objekten einen Komplexitätsparameter zuzuordnen zu wollen; in dem hier betrachteten Fall Lundgren-Wirbel.

Nachfolgend werden die Ergebnisse einer Reihenuntersuchung zur fraktalen Dimension unterschiedlich ausgeprägter Lundgren-Spiralen gezeigt. Die Berechnung erfolgte nach den von Felgenhauer (2021)⁷³ dargelegten theoretischen Grundlagen mit dem dort beschriebenen statistischen Matrizenverfahren.

Eine Daumenregel könnte nun lauten: „ist die fraktale Dimension eines Objekts groß, findet sie auch eine größere Wahrnehmbarkeit durch Sinnesorgane. Egal ob nun biologisch, synthetisch, real oder nur wirklich. Die Analyse betrachtet nur ebene Wirbelstrukturen. Und im Grunde geht es ja nur um das Prinzip dieses Komplexitätsparameters. Wir nehmen aus der Reihenuntersuchung mit, dass aufwändige Form, mehr Komplexität, auch eine höhere fraktale Dimension gebiert. Was uns an dieser Stelle keineswegs verwundert. Dem Analyseergebnis implizit ist aber und das sei relevant, dass eine „ordentliche“ im Sinne von „geordnete“ Form dicht und kompakt und deshalb detektierbar ist. Sehr schön.

Egal, WAS ein Fisch auch sieht, egal, WIE ein Fisch es sieht: bigger is better! Und es ist wie bei Käpt'n IGLO⁷⁴: wie bescheuert der Werbespot auch sei, man weiß halt, dass Fischstäbchen eigentlich ganz gut schmecken. Das nehmen wir jetzt mal so mit.

⁷³ Felgenhauer, Mi. (2021). On the fractal nature of synthetic Lundgren structures; erscheint im März 2021 im GRIN-Verlag GmbH München.

⁷⁴ 1985 wurde in Deutschland die Werbefigur Käpt'n Iglo eingeführt. Diese basiert auf der 1966 von der Werbeagentur Lintas erfundenen Figur Captain Birds Eye. Seitdem wurde der Käpt'n Iglo mit verschiedenen Darstellern besetzt.

Also: Käpt'n IGLO ist nicht tot. Er riecht nur so komisch.

Wirbel, Flossen und Kamele

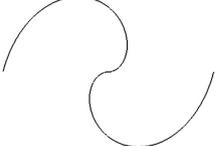
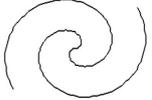
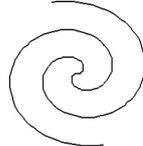
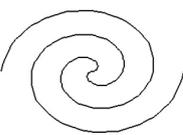
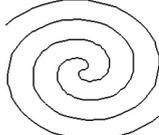
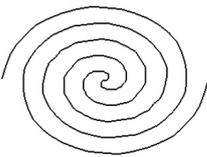
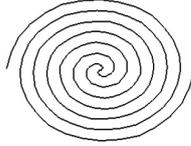
		
$N=0.05 \quad \text{fracD} = 1.08$	$N=0.2 \quad \text{fracD} = 1.11$	$N=0.5 \quad \text{fracD} = 1.13$
		
$N=0.7 \quad \text{fracD} = 1.303$	$N=0.9 \quad \text{fracD} = 1.42$	$N=1.1 \quad \text{fracD} = 1.446$
		
$N=1.3 \quad \text{fracD} = 1.481$	$N=1.5 \quad \text{fracD} = 1.50$	$N=1.7 \quad \text{fracD} = 1.513$
		
$N=1.9 \quad \text{fracD} = 1.524$	$N=2.5 \quad \text{fracD} = 1.562$	$N=4.5 \quad \text{fracD} = 1.69$

Abb.36: Fraktale Dimension von Lundgren-Formen (nach Felgenhauer(2021). On the fractal nature of synthetic Lundgren structures).

Beinahe ein Kamel.

Berlin Wedding, der Blumenladen in der Seestrasse

„Wie hast Du das gestern gemeint, Sanne, Du hättest alles verstanden?“ Gudrun umfasst Sannas Hände.

„Na, ja, genau so. Mein Abitur war grottenschlecht, weißt Du ja. Aber zur Fachhochschule, hat es gereicht. Gleich hier drüben, die TFH. Um die Ecke. Ich schrieb mich da ein. Ich wollte wissen, wie Dieselmotoren funktionieren. Wie Flugzeuge fliegen, wie Motorräder um die Ecke flitzen, warum funktioniert das alles, wie es funktioniert? Sowas halt“.

„Und?“ Gudrun hatte Sanna damals aus den Augen verloren, als die dann, .. nein als die Gudrun selbst keinen Boden unter den Füßen hatte. Oh, Gott, Scheiße, mein Kind.

„Aber die Profs waren einfach nur bescheuert. Wir sollten betriebswirtschaftliche Listen erstellen, Marktanalysen aus dem Internet kopieren, Machbarkeits-Studien, Konzepte für das Marketing. Alles war schon fertig, immer das Gleiche, Marketing, was will das überhaupt im Maschinenbau?“

„Klingt doch gut, Marketing, wo ist das Problem?“ Gudrun fühlt sich jetzt gleich ein wenig wohler. So sollen sie es doch lernen, die jungen Heißdüsen. Wie die Welt funktioniert. Kein Mensch braucht ...

„Aber ich wollte doch bauen, schrauben, zeichnen, konstruieren .. im Keller irgendwelche stampfenden Maschinen donnern lassen.“ Sanna legt den Kopf schräg, „Weißt Du, wie das ist, wenn alles nach Nitromethan riecht? Die Gardinen hochfliegen, weil der COX-Motor hochdreht?“

„der COX-Motor?“

„Ja verdammt, der Cox-Motor. Der Wofhard..

„Der Wolfhard?“ Gudrun ist jetzt hellwach, „Susanna! Sanne?“

„Ja, der Wolfhard. Der Wolfhard hatte eine ganze Sammlung von Benzin-Motoren. Und tonnenweise Nitromethan. Wir haben dann gespielt: eins, zwei, wrommmm. Alle die Gardinen fliegen hoooch“.

„Wolf, hat? Hat Dich? Als ich? Wenn ich? Sanne, bist Du sicher?“

„Natürlich, Tante. Der Wolf hat auf mich aufgepasst; mir alles beigebracht, alles was die Spakkos von der TFH, .. egal. Du hast gedacht, ich häng da ab am Nettelbeck! Jeden Tag. Mit den Anderen. Du warst ja nicht da. Immer, aber: Wie kann man nur so blind sein. So blöd. Der hat Dich doch geliebt, der Wolf. Der wollte doch nur der Wolfhard sein. Natürlich kamst Du dann irgendwann angewackelt, meine Tante, in Hot-Pans, der D-Typ. Und dem Wolfhard stand der Kamm hoch, mindestens. Aber niemals, niemals hast Du gesehen, wer dieser Mensch überhaupt ist, mit seinen krausen Locken, dem Motorenöl, dem Nitromethan, den Formeln und Zeichenblättern, den Raptographen und Zirkeln, den Rechenschiebern und Kurvenlinearen. Wer das eigentlich wirklich ist.“

„Aber Du, ja?“

„Aber ich, Ja. Ich war ja klein. Ich hab' ihn geliebt, den Onkel Wolfhard. Meinen Onko. Wolf konnte übrigens kochen.“

Sie fängt Gudruns Blick auf. „denk diesen Denk nicht weiter, Tante Gudrun!“ Selten sagt sie Tante, nur wenn es ernst wird.

„Sanna. Als Deine Mama verschwand, warst Du drei. Als Deine Mama verschwand, kamst Du zu uns, als Deine Mama verschwand, war auch der Wolfhard irgendwie schon ... weg? Verschüttet in Computern und Formeln und Motorenöl und Schrauben und Balsaholzspänen. Da war ich alleine. Wie hätte ich Dir das denn alles erklären sollen? Natürlich war ich, wie ich war, wie sollte es auch anders gewesen sein? Hätte anders sein können? Der Wolfhard war immer nur, immer nur .. wie das 12. Kamel. Kam und sah und ließ sich feiern und brachte Haribo mit für das hübschblonde Sanna-Kind. Und Zack, weg war er wieder.

Natürlich war das ganz einfach. Für den Wolf. Du und ich auch irgendwie blond, Hot-Pans, ok, Tank-Tops, Stiefelchen und natürlich dachten alle, du wärst mein Kind, Du warst auch mein Kind, Susanna, du bist doch mein Kind“. Gudrun schiebt Krümel zusammen und dreht sich eine Zigarette. Findet das Feuer nicht. Findet dann doch eins. Hustet. Eine Oktave höher, dann: „Nach der Maueröffnung hatte er dann eine Freundin. Irgendwo im Osten. Verstehst Du, Sanna, im Osten, Hölle. Da fahr ich also hin. Und wir, wir, der Wolfhard und eine Ossi-Tussi? So ein Depp, oder nicht?“

Die Sanna, die Gudrun, sie liegen sich jetzt in den Armen und flennen. Draußen erstirbt nun ein Motoradmotor. Es ist die Velo Solex.

„Susanna“, sagt Bruno, der die drei Stufen in den Blumenladen hochstürmt. Wenn er Suhu-Sanna sagt, bedeutet das immer nix gutes.

„Susanna, hast Du morgen was vor?“

„Ich, äh, morgen?“. Eigentlich wollte Sanna ja ins Para-Bad. Aber das ist ja auch nicht mehr so wie zu Seepferdchens Zeiten. Einfach zu viel Chlor. „Ich hatte, .. ich wollte, .. mein freier Tag, ja, also NEIN“

„Stell Dir vor, Sanna ..“, na geht doch, denkt Sanna, „ Ich habe da so einen Typen aufgetan, in Fino-Dings, im Internet, total alt, der baut auch Flugzeuge, also Modelle wie Wolfhard und der ist supernett, nein eigentlich nicht, aber der würde die Camel kaufen. Da fahr ich morgen hin, nach Fino und wenn Du vielleicht, ich dachte wir beide, nach Fino-Dings. Hast Du Zeit? Bitte!“.

„Total alt? Na dann“, denkt Gudrun, ach der Bruno! „Äh, Fino? Ach du Scheiße!!“

„Der Kevin hat mir eine Kiste besorgt und ich hab´ gerade noch Sprit kaufen wollen. Nitromethan. Aber die haben mich da nur blöde angekackt, als wollt ich ne Bombe zusammenbasteln. Geht auf die

Nieren, sagt der Heini, brennt wie der Teufel, total giftig, sagt die Tussi. Ich hab mich nicht getraut sie auseinanderzubauen, die Camel. Deshalb der Karton, passt gerade mal rein, also quer halt.“

Diagonal, Bruno, denkt Sanna und sieht die riesengroße Kiste vor der Waschstraße stehen, „ich dachte das ist der Sarg für den Kunden, der es gestern nicht aus der Waschstraße geschafft hat“!

Das Wetter ist klasse. Ein Donnerstag. Verstohlen linst Bruno zum Beifahrersitz. So süß. Sanna hat gute Laune oder schlechte Laune, der Bruno bekommt es nicht heraus. Sie sprechen über den Kunden, gestern, lachen, belangloses Zeug. Im Radio plärrt irgendein komischer Sender. MegaQuizzAmmorgen mit Gerdi und Gerdi. Nach einer langen, dann eher schweigsamen Stunde sind sie endlich am Ziel. Ein Mann mit Motorradhelm unterm Arm winkt sie in die Einfahrt der verlassenen ARAL-Tankstelle. Harald.

„Harald“, sagt Harald, „fahr mir einfach nach“. So sind sie halt, die Ossies, denkt Bruno, immer ein bisschen grantig. Bruno hat Mühe der qualmenden Maschine zu folgen. Es geht hin und her und die rote Ampel scheint für Harald nur eine vage Empfehlung zu sein. Und noch eine unerwartete Kurve. „Eine ETZ“, stellt Bruno fest, nur irgendwie kleiner, kürzer kommt sie ihm vor. Komisch, egal. Dann endlich, aus den Katzenköpfen wird Sand und eine Schranke geht auf und der alte Lieferwagen poltert auf einen Parkplatz mit riesigen Schlaglöchern. Das scheint hier ein Militärgelände zu sein. Dem Bruno wird etwas mulmig, aber er hat ja Susanna an seiner Seite. Die sagt aber nix? Wie in dem Agentenfilm aus den 80ern. DoktorNO oder so.

„Sie sprechen doch deutsch?“ „Ja“, sagt der Bruno. „Nur wegen dem Döner“, sagt Harald. „des Döners“ denkt Sanna, meint Sanna.

Bruno hatte es ihr auf der Fahrt erklärt. „Der Memet“, begann er, „der Memet hatte noch eine alte Rechnung offen, eine sehr alte Rechnung. Also er bei mir, der Memet. Ich hab ihn gefragt, ob ich vielleicht dafür seinen alten Liefer mal haben könnte, nur für heute. Und ja, sagt der Memet, aber sie muffelt, die Karre, ein wenig und keinen Sprit hatte sie auch, erst mal tanken, Diesel, aber die Kiste, vom Döner, die lange Fahrt, ach Du weißt schon, Sanne“.

Harald. Vorsichtig zieht Bruno die Kiste durch die offene Lieferwagentür, macht sie auf. Als der Harald nichts sagt, sein Blick nur so böse auf dem Bruno einrastet, wie ein Klappspaten beim zuklappen, fragt schüchtern der Bruno: „und?“ und dann: „Ich hab sie geerbt, quasi. In Berlin“.

„Pass auf, Bruno und Gudrun oder wer immer ihr seid, Kleines, kommt mit. Hier läuft ein ganz übles Ding!“

Gudrun?, denkt Sanna, „hier läuft tatsächlich ein ganz, ganz übles Ding? Ja, genau das“.

„Das ist eine Camel“, sagt der Bruno, wie jetzt irgendwie ganz in den schlechten Film versetzt, „eine Sopwich F1 Camel“, sagt Bruno, „um genau zu sein“.

Harald erinnert Bruno an einen Comic-Hai. Mit drei Zahnreihen. Solche Leute mag er gar nicht. Nicht im Wedding. Und nicht in Finodings-Furts.

„Ja natürlich ist das eine Camel. Und sie gehört einem alten Freund, wo hast Du sie her? Verdammt!“

„Dann kennst Du den Wolfhard?“

„Na klar“, raunzt der Harald. „Und woher kennst Du den Wolfhard?“ an Bruno gewandt.

„Das ist mein Onkel“, sagt Sanna, jetzt irgendwie aufgebracht. „Der Wolfhard ist tot. Ihr kennt Euch?“

„Tot. Mist. Ja, Gudrun, wir kennen uns. Fürwahr, Kleines“. Harald kickt einen unsichtbaren Stein ins Gelände.

Gudrun? Der Rest der Geschichte wird jetzt reichlich komplex. Oder auch nicht.

„Kommt mit“, sagt Harald und bleibt plötzlich stehen. Wirbelt herum. „Wir alle waren damals scharf auf die Kleine“, da wird der Sanna jetzt irgendwas Diffuses gewahr. Was Peinliches. „Meine Tante?“

Und Harald erzählt, wie der Wolfhard eines Tages auftaucht und alles weiß über die PZL-M18⁷⁵. Und den WSK-Motor⁷⁶. Obwohl der doch ein Wessi ist. Und der Ingo, der ging nach Chile, als Ernteflieger, als die DDR zusammenklappte. „Eim gogo, sang der. Keiner brauchte noch alte Erntis, wie den Ingo. Also hat der den Abgang gemacht. Wir waren zwar Flieger. Aber keiner wusste den alten Schraubensack zu insten. Und dann taucht plötzlich der Wolfhard auf. Aus dem Nichts. „Ein Wessi“. Harald schüttelt den Kopf: „ein Wessi!! Da, die alte Dromedar war dem Wolf sein „Projekt“ wie ihr Wessis das nennt.

Sanna und Bruno stehen vor einem alt- gelben Monster. „Die Dromedar“ sagt Harald. Wolfhard war immer hier. Also bis spät. Öfter als wir alten Ernte-Flieger. Wir hatten zu tun. Und der Wolf wusste alles über die M-18. Der war total verrückt. Der Wessi. Die Interflug gab es ja nicht mehr. Es gab auch kein

Takeoff Weight (MTOW)	4200 kG
Overload operations	max. 5300 kG
Maximum Payload	2200 kG
Range	1000 km
Takeoff Run (4200/5300 kg MTOW):	190 m (350 m)
Rate-of-Climb Speed	6.5 m/s (4.4 m/s)
Operating Speed Range	170 do 200 km/h
Wing Span	17,7 m
Wing Area	40 m ²
Polskie Zakłady Lotnicze Sp. PZL Mielec, a Lockheed Martin Company is the biggest Polish manufacturer of aircraft,	

⁷⁵ The M18 Dromader is designed for ag air operation of large fields areas and forest-, bush-, and crop fire fighting. M18 has been type-certificated by 15 foreign airworthiness authorities, including the USA (FAA), Canadian, Australian, Brazilian, EASA (EASA.A.056) and others. The airplane is a single-engined, low-wing, all-metal monoplane with a fixed-type main gear and a tail wheel.

⁷⁶ 9-Zylinder-Sternmotor WSK „PZL-Kalisz“ ASz-62IR. Der Schwesow ASch-62 (russisch Швецов АШ-62, vor 1941 als M-62 bezeichnet) ist ein luftgekühlter Neunzylinder-Sternmotor, der in der Sowjetunion hergestellt wurde. Die Bezeichnung bezieht sich auf die Initialen seinen Konstrukteurs Arkadi Schwesow.

Geld. Erst waren wir die Helden. Plötzlich waren wir die Vollidioten, die mit den alten Klapperkisten das Gift über die Felder versprüht hatten. Ich musste zum Gericht, nach Berlin. West-Berlin! Förmlich Jagt gemacht haben sie auf uns, die Wessis. Auch die NVA wollte uns nicht helfen. Jetzt war ja alles BW, also Bundeswehr. Ein Jahr vorher hätten wir die noch abgeknallt. Ja, natürlich nicht mit der Erntekarre. Das war ja nur Spaß, also Job, also Fünfjahresplan und Felder, Felder, Felder. Wir flogen nicht nur für die Interflug, auch die Erichs. Und für Gott. Margot und dann auf einmal: Sonderzug nach Panko und so. Ehrlich“.

„Noch einmal zurück“ sagt Sanna. „Der Onkel war hier? Bei euch?“
Bei Euch Osis!, hätte sie beinahe gesagt.

„Wolf hatte goldene Hände, wie man so sagt. Brachte sogar den Sprit mit. Der Ingo hatte sich nicht nur nach Brasilien abgesetzt oder Chile oder sonst wohin, der hatte auch die ganzen guten Teile im Koffer. Keinen Muks tat die M-18 mehr. Das musst Du die mal vorstellen, Gudrun.

„Susanna“, sagt Sanna.

„Und er hatte immer die richtigen Schlüssel im Rucksack, wenn er mit seiner EMW angeknattert kam. Genau die Gekröpften, die Maul, oder ne passende Lehre, die 36er Nuss für das Gebläse, als hätte er sich die zu Hause seit Jahren zurechtgelegt. Kennst Du vielleicht jemanden mit ner 36er Nuss in seim Kasten?“

„Die R26 war aber keine EMW“, sagt Sanna.

„Und dann eines Tages die Kleine, oh Gott“

„Meine Tante, oh Gott“

„Er hat sie zum Laufen gekriegt. An dem Tag. Gerade als sie anlief, stand sie da. Alles flog durch die Gegend. Die hatte ja fast nix an. Und die Dromader soff dreißig Liter in acht Minuten. Wir waren alle sofort verschossen in die Kleine. Alle“, sagt Harald.

„in die Gudrun, aha“, denkt Sanna, na warte, Tante. Harald glotzt weiter blöde in das Leere hinter Susanna.

„Was ist jetzt mit der Camel?“ fragt der Bruno um das Thema zu wechseln? Oder ganz unvermittelt. Oder weil er Angst hat, dass der Harald die Sanne mit seinem Glotzeblick wegbeamt.

„Der Wolf ist tot“, sagt der Harald. „

„Aber seine Camel ist jetzt hier“, sagt der Bruno.

„Wir sind ja irgendwie nur noch Museum. Vielleicht? Aber wir sind auch irgendwie arm, Gudrun. Nimm sie wieder mit nach Berlin. Irgendwie. Es war sehr schön Dich nochmal gesehen zu haben“.

„So ein Quatsch“ sagt der Bruno. „Das ist voll in dem Wolfhard sein Sinn. Die Camel bleibt hier“.

„Au Kacke. Du Genitiv“, denkt Sanne.

Schon die ganze Zeit steht ein junger Polizeimann? hinter Bruno und Sanne und die Mütze wandert durch seine Hände wie bei so einem Küchenquirlmixding, „Äh, Chef?“

„Ich weiß. Ja doch“ raunt der Harald, „hat mich auch schon angemailt, angeblich hat er Durchfall und kommt nicht vom Klo. Ruf Frankfurt an“.

„Die haben uns schon zweimal den Arsch ge... , oh pardon Du hast ja Besuch, also schon zweimal in vier Wochen, äh .., geholfen, da kann ich nicht nochmal ankommen. Also Harald. Nix kann so wichtig sein. Jetzt flieg halt mit“.

Der wirbelt herum und streckt den Zeigefinger direkt auf Susanna: „Du bist ja schwindelfrei, Gudrun! Ich habdane Idee.“

Am nächsten Tag im Blumenladen, Seestrasse, Berlin Wedding.

„Oberleutnant Dukowsky - für Dich Markus - hast Du schon mal ne WBG-X - . .“ äfft der Bruno.

„Ja-ha“ leuchtet Sanne, „Fliegerkombi, Funk, Helm, die TIX⁷⁷, die ganze Packung, BW-Sonnenbrille“.

„Er hat Dich einfach so abgeschleppt“, raunt der Bruno.

Was war passiert? In Fino oder wie das immer auch heißt, ist auch der Zoll stationiert. Und der Harald ist da irgend so ein hohes Tier. Und dem Grenz-Flieger war genauso gerade, irgendwie der Beifahrer (?) abhandengekommen. Und sie brauchten jemanden der die Kamera bedient. Oder so tut. Das darf natürlich kein Zivilist sein oder jemand, der so aussieht wie ein Zivilist oder überhaupt nicht fliegen kann oder auch nur nicht mitfliegen kann, aber eigentlich ist es viel schlimmer, wenn der zweite Mann fehlt, das sieht man dann vielleicht von unten her oder wie auch immer. Oder um es kurz zu machen, ein ganz krummes Ding. Und genauso, wie sie es liebt!

„Die fliegen da mit diesen Gyro-Coptern. Die Grenze rauf. Die Grenze runter. Und wenn da so ein kleiner weißer Lieferwagen auftaucht, klick, klick. Dann musst Du ihn fotografieren. Kam aber keiner. Also fliegt er so dicht über die Wiesen, wie es nur geht, der Markus Oberdings. Diese Gyros sind so eine Art Hubschrauber nur kleiner. Und Du sitzt quasi im Freien. Es ist wie Motorradfahren. Es ist einfach wunderbar. Bruno, lach doch mal, manno“.

Der erzählt jetzt von dem kantigen Harald. Also, was Harri erzählt: „Wir waren die Ernteflieger. Wenn Du über die Felder donnerst, bist du frei.; und du bist ja immer direkt über der Granne. Und stell Dir vor, je tiefer du fliegst, umso einfacher geht das“.

Der Bruno war erstaunt, dachte, das sei genau andersrum. Harald zeigt sein Haifischlachen, „das sieht immer total gefährlich aus, ist aber das einfachste von der Welt. Manchmal hatte ich eine

⁷⁷Wärmebildgeräte (WBG) sind optische beziehungsweise optoelektronische Nachtsichtgeräte mit [Wärmebildkamera](#) (auch *thermal imager* genannt).

Flamme dabei, die hat sich beinah eingemacht, wenn ich mit beiden Armen so Flatter-Flutter gemacht habe, huii“ Harald macht eine Flatter-Flutter Bewegung mit seinen Armen in den öligen Blaumannärmeln, „und deine Flossen nicht am Steuerknüppel waren; bei hundertfuffzig!“

Aha, denkt der Bruno, der bei Memets Liefer nicht mal bei 60 das wummernde Lenkrad loslassen würde.

Haifischzähne: „Je tiefer Du fliegst, umso sicherer wird das. Der Bodeneffekt, pass auf: linke Tragfläche...“, sein linker Arm neigt sich zu Boden, „ich bin fast am Boden. Der Widerstand ist irgendwie weg. Wupp,“ der linke Arm geht nach oben, der rechte geht nach unten. „Jetzt bin ich wieder fast am Boden. Der Widerstand geht irgendwie weg. Wupp. So geht das hin und her und hin und her.“

Haifischlachen. „Und dann stabilisiert sich alles“. Beide Arme sind nun in der Horizontalen. „Je weiter ich nach unten gehe, umso größer ist der Bodeneffekt. Erst gehe ich links, dann rechts, und langsam gleicht es sich aus.“ Harald klopft dem Bruno auf die Schulter, sagt: „der Wolf könnte dir das jetzt 1 zu 1 erklären. Guck mal, das ist sie, die Dromedar, mein polnisches Bauerntrommel, vornerum aber Landadel.



Abb. 33:
M18 Dromader.

Und da stand er da, der Wolf, der Wessi: „die kannst du mit dem BW-Essbesteck⁷⁸ insten“ sagt der, „und stell Dir vor, Bruno, genau das hat der gemacht. Einen Tag und eine Nacht und die Dromader lief!! Ein Wessie, der noch nie geflogen ist“.

Ernteflieger. Bruno wischt jetzt auf der Motorhaube der Dromader rum. Links unten steht: GUDRUN.

„Pass auf, Bruno. Stell Dir vor, du bist Flieger.“ Harald guckt jetzt weniger haifischartig, „und eigentlich fliegst Du eine MIG 23“, schaut den Bruno an, „und dann baust Du irgendwie Scheiß“, schaut den Bruno nicht mehr an, „dann kommst du zur INTERFLUG, bist bei der INTERFLUG und bleibst bei der INTERFLUG“.

OK, denkt der Bruno.

„dann bist Du doch froh, dass Du überhaupt fliegen kannst.“ Harald fixiert irgendwas an irgendeinem Horizont.

„Überhaupt nicht klar, Mann!“, sagt der Harald. „Fliegen ist das Leben!“

Harald sieht irgendwie besoffen aus, „Fliegen ist mein Leben und jetzt kommen die Wessis und sagen dir, dass du 20 Jahre Gift gespritzt hast und du gefälligst froh sein sollst, dass du nicht in den Knast gehst, in den Wessi-Knast. Komm, wir gehen jetzt zu Anneliese, nen Bräuler essen. Ich lade Dich ein!“

Bruno ist total erschöpft von seinem Bericht. Sanne sitzt jetzt auf ihrem Hocker, rücklings, wie Snoopy auf seiner Hundehütte, sie ist vollkommen aufgelöst, sehr süß, denkt Bruno.

⁷⁸ "Bundeswehr Eßbesteck" Bundeswehr Outdoor Essbesteck in schwerer, hochwertiger Ausführung aus rostfreiem Stahl. Das 4-teilige Feldbesteck oder Camping Besteck besteht aus Löffel, Gabel, Messer und Spezialhalterung mit Flaschen- und Büchsenöffner, die platzsparend zusammensteckbar sind: Messer, Gabel, Löffel, Dosen-/Flaschenöffner / hochwertige, schwere Ausführung BUND eingestanz / Gewicht: ca. 210g

„Die nehmen dort auch Mädchen, also Frauen. Beim Zoll. Bei den Fliegern, hat mir der Oberdings, der Markus, gesimst. Weil die so leicht sind. Jetzt guck doch nicht so böse, Bruno! Brüünoo?“

Oh, oh, denkt der Autor. Muss ich da in naher Zukunft was mit Gyro-Coptern schreiben?

„Gesimst? Leichte Frauen!“, denkt der Bruno, so heißt das doch, oder? „Aber ich hab ja auch was tolles erlebt“ sagt der Bruno stattdessen, „Vielleicht nicht so toll wie der Markus und auch nicht mitten in der Luft und leicht und mit Funk und Helm und Hotpants“ „Du bist so gemein...“

„Hotpants?“ grinst Gudrun, denkt Gudrun. Wer weiß schon warum?

„Wir hatten ja Zeit“, meint Sanna, „richtig viel Zeit! Der Markus ist ja wirklich ausführlich“. „The Job isnt no Job“, sagt Susanna.

Es ist nicht herauszubekommen, ob der Bruno wirklich sauer ist oder nur so tut. Auf jeden Fall holt er jetzt sein Handy heraus und zeigt der Runde ein paar Fotos. „guck mal, Gudrun. Da ist die Sanne und das ist das Projekt von dem Wolfhard“. Gudrun wischt sich eine Träne aus dem Augenwinkel. Bruno zoomt das gelbe Ungetüm heran, „da, siehste?“. Sie kann es nicht lesen, sie braucht es nicht lesen, sie weiß es auch so.

„Gudrun“, sagt Bruno, „kannst Du mir mal erklären, warum auf dieser alten Karre „Gudrun“ draufsteht?“

„Ich weiß es nicht?“ haucht Tante Gudrun.

„Wir schon,“ sagt Sanna. „Vor drei Wochen, Tante Gudrun, Corona.“ „Jetzt läuft es aus dem Ruder“, denkt Gudrun.

„Als Du Deine Schränke ausgemistet hast, da nahm ich „Sack after Sack“ mit rüber zum Bruno. Waren es drei oder fünf oder zehn? Und weißt Du, was ich da gefunden habe?“

„Natürlich“ sagt Gudrun, „mein Leben!“.

Rückblende: Fino 1990, Wolfhard, Gudrun, Rot, Stiefelchen, Blond, Harald. Und Alle. Und Überhaupt. Als hätte sie bei Sarasani ne ganze Kiste voller Karnickel hypnotisiert. Und, ja, ein bisschen overdressed, oder underdressed, wie man es nimmt. Das geliehene knallrote Käfer-Cabrio, verwuschelt und nicht gesellschaftsfähig wie in Nicht gesellschaftsfähig. Sie wollte doch nur rausbekommen, ob der Wolf eine Freundin hat. Und ja. Hatte er: Ein Dromedar. Mist, denkt Gudrun, das alles ist jetzt viel zu komplex für jetzt.

„Ja, gut, ok. Was kann ich denn dafür, dass auf einem scheißgelben Kamel-Rosthaufen GUDRUN steht?“ Wie weit vorne man auf so einem Stuhl sitzen kann, denkt Gudrun, ist wirklich erstaunlich. Das Kind ist ja .. Ohne Gnade. Das hat sie nicht von mir. Denkt Gudrun.

“Also Tante Gudrun, Mama, wie war das damals? Fino? Tank und Hot? Sag schon!“

Draußen erstirbt ein Motor. Es ist der Kevin. „Mein Erlöser“, denkt Gudrun.

„Sanne, wir hatten einen Backtermin!“

„Ja, stimmt, Kevin, es passt aber gerade nicht. Komm erst mal rein. Haste Mehl, Hefe, Eier und so? Margarine?“. Vielleicht kann sie auf diese Weise den Kevin noch mal um die vier Ecken schicken. Gerade jetzt, wo es spannend wird.

„Logo“, sagt der Kevin.

Drei Dosen, so etwa im R-B-Format kullern auf den Tisch.

„Genial“ sagt der Bruno, „zeig mal“.

Zur Zubereitung:

1. Dose knacken und drehen
2. Teigstücke trennen und einschneiden
3. Bei 200 °C 10-15 Min. auf Backpapier backen

„Das ist doch kein Backen, nicht wirklich!“ sagt Sanne, „Mann Kevin“!
„Doch“, sagt der Kevin!

Am Ende ist alles ganz einfach: knack, plock, die Dose platzt, irgendwas Lustiges formen, rauf aufs Blech, zugucken beim braten, nein backen, und lecker. Und ganz am Ende:
„ich hasse Abkürzungen, schmeckt aber“, meint Sanne.

Und damit endet auch die Wedding-Geschichte. Eigentlich schade. Die Personen sind frei erfunden. Irgendwie fange ich aber an, sie zu lieben. Sie sollten doch nur das „Kamel“ transportieren. Das zwölfte, das dritte, so was halt.

Sanna und Bruno gibt es nicht, den Kevin auch nicht, den Wolfhard ein bisschen. Meine COX-Motoren wurden irgendwann von meiner Schwester auf einem Flohmarkt verhökert. Damit der Junge, also mein Neffe, mal lernt, wie man kauft und verkauft. „Deine alten Flugzeug-Sachen aus dem Keller!“, sagt sie, „das ist doch OK, oder?“, sagt sie. Mütterpädagogik. Gibt es etwas Schrecklicheres? Vorbei.

Döner von Memet war kein Matsch-Döner, im Gegenteil. Der Beste Döner im Wedding und einer der Ersten in den 80ern. Der allererste für mich, um genau zu sein. Beim Döner Müller- Ecke Kameruner waren wir oft, die Kinder und ich. In der Bude, beim traurigen Memet, plärrte eine Mittelwelle immer sentimentale Orientalmuse. Und eines Tages war er weg, der Memet. Ich nehme mal an, das Heimweh hatte gesiegt. Und heute? Müller-Ecke-Kameruner liegt auf meinem Schulweg, wie man so sagt. Dort ist es immer voll. Ich steige vom Rad

und winde mich durch die erste und die zweite Reihe von Benzen und SUVs. Gut riechts hier, fahre dann über die Müller nach Hause.

Gudrun ist nicht Gudrun, aber meine große Liebe. Anders als Gudrun erträgt sie Schmieröl, Rechenschieber, Nachtschichten und Formeln seit jetzt über vierzig Jahren. Lieben Dank, Tank-Girl, an dieser Stelle.

Und Fino? Natürlich. Ob dort wohl der Zoll fliegt? Wahrscheinlich nicht. Aber das ist auch egal. In der Fino-Luft wabert Sprit. Das alleine zählt. Also fahre ich dort hin. Alles ist zu. Alles ist verborgen. Die gelben Monster wollen gesucht werden. Das mach ich. In meinem Kopf eine Szene von der Transitstrecke.

Wer zu Zeiten der Berliner Mauer mit achtzig Sachen über die Transitstrecke durch Brandenburg oder Thüringen hoppelte, hatte hin und wieder eine Erscheinung der trabigelben Art, die einen von unendlich vielen Schlaglöchern entnervten Wessi den einen oder anderen Autobahnkilometer auf Augenhöhe begleitete. Die polnische Erntefliegerin PZL-M18 Dromader.

Hatte ich je ein hässlicheres Flugzeug gesehen? Ich war sofort fasziniert und verliebt. Auch das CSSR-Baumuster LET Z-37 Cmelak (dt.: Hummel)⁷⁹, die im Vergleich zur polnischen Dromedar prinzessinenschön ist und in ihrer robusten Anmut an die, damals im Westen eher bekannte Piper Pawnee erinnert sah man gelegentlich über die endlosen, volkseigenen Gülleplantagen knattern. Agrarflieger waren für mich immer das High-Light der Transitstrecke. Wie schade, dass auch dies - wir vergiften heute die Pflanzen viel eleganter gleich mit

⁷⁹ Das tschechoslowakische Flugzeug LET Z-37 A Cmelak (= Hummel) ist ein Spezialflugzeug für die Landwirtschaft. Die Z-37 wurde in der CSSR ab 1965 gebaut und in großen Stückzahlen bei der Interflug in Dienst gestellt. Haupteinsatzgebiet war dann der Agrarflug. Das Triebwerk war ein KTW M-462RF mit 230 kW Leistung. Die Startmasse betrug 1850 kg, die Geschwindigkeit wurde mit 185 km/h angegeben, und die Reichweite mit 600 km. Die spannweite beträgt 12,20 m.

Der Iwtschenko AI-14 (russisch Ивченко АИ-14) ist ein sowjetischer Flugmotor. Das Kürzel AI nimmt auf den damaligen Leiter des gleichnamigen Konstruktionsbüros Alexander Iwtschenko Bezug, der für die Entwicklung des Triebwerks verantwortlich zeichnete. Nachfolger ist der Wedenejew M-14.

https://de.wikipedia.org/wiki/Iwtschenko_AI-14

dem Saatgut - jetzt vorbei ist. Für die 600 PS starke, polnische PZL-106 Dromader wird eine Start- /Landerollstrecke von 200 [m] /160 [m] angegeben. Die tschechische hummelhübsche Cmelak kommt mit einem einen 9-Zylinder-Sternmotor Avia M 462 RF, der eine Startleistung von etwa 300 PS aufzubringen in der Lage ist, aus. Ist das nicht wunderbar?

Fino 2018. Nirgendwo darf man rein, theoretisch; aber es ist einfach phantastisch, dann doch drinnen zu sein. Ja, doch, sie fliegt nicht mehr, die alte Dromader, aber wenn du deine Hand auf die Zylinderrippen legst, spürst Du, wie ein letzter, ganz leichter Atem deine letzten, ganz grauen, elenden Härchen aufstellt. Man bleibt halt blöd. Und Maschinenbauer. Immer.

Wedding. Die Tankstelle in der Seestraße ist wirklich. Von der SEE100 schaue ich drauf. Erinnerung. Keine Waschstraße, kein Bruno-Büro. In den 80ern gab es ja noch keine Spätis, aber die ARAL, dein letzter Verbündeter auf der Suche nach einem nächtlichen Stubi.

Der Blumenladen? Nein, nicht wirklich. Nicht Gudrun, nicht Sanna, nicht Kevin, nicht Bruno. Oder doch? Verbolzte Teppen in einem Nachbarhaus? Vielleicht.

Der infantile Ansatz

Aus der „Sicht“ des Fisches ist es wahrscheinlich ganz „natürlich“ einen Sinnesreiz mit einer Körperbewegung zu „verantworten“. So, wie wir lachen müssen und zusammenzucken, wenn uns jemand kitzelt; obwohl bei der Forelle der Fall etwas anders liegen könnte. Davon, dass jede Fluid-Struktur-Wechselwirkung passive Anteile enthält, bin ich – ganz unabhängig von dem hier über Wirbel Gesagten – überzeugt. Nicht-kognitiv unterlegte, passive Körperbewegungen wurden

seitens der Wissenschaft und ganz besonders von (uns) Maschinenbauern bis hinein in die jüngste Vergangenheit gerne unterschätzt. Gerade dieser Tage werden wieder Fragen einer zukünftigen urbanen Digitalisierung und Vernetzung, der Stadt der Zukunft, der Smart City, mehr noch: der der „Brain City“ mehr und mehr mit Konzepten so genannter humanoider Robotik in Verbindung mit künstlicher Intelligenz KI beantwortet ohne dass erkennbar wird, tatsächlich vom „Wirbeltierwesen“ den Umgang und das Potential passiver Körperlichkeit gelernt zu haben. Die von mir in meiner Umgebung beobachtbaren Roboter haben das Stadium der Mikroben noch lange nicht erreicht, von Insekten ganz zu schweigen. Natürlich ist es spektakulär einen dem Menschen ähnlichen Roboter zu bauen, ohne vorher bei einem Insekt vergeblich die für die Lokomotion zuständige „Zentraleinheit“ gesucht zu haben.



Abb.34:
..uui,
patsch,
wusch!
(von oben nach unten)

Welche Rolle die aktiven kognitiven und welche Rolle die passiven nichtkognitiven Elemente der Wahrnehmung, Behandlung und Verarbeitung von (Strömungs-) Information und den fluidmechanischem Impuls beim Transfer von Energie aus dem Fluid und in das Wesen und wieder in das Fluid wirklich spielen, weiß ich auch nach hundert Seiten nicht zu beschreiben. Wahr ist, dass der Fisch einen Energie- und

Impulseintrag mit Bewegungsgebaren „verantwortet“, die Impuls-adaption im Sinne einer Fluid-Struktur-Wechselwirkung erfolgt. Was wir begrenzt, bescheiden und ohne Naturwissenschaftler zu sein, seit den späten 90er Jahren recherchieren konnten, was wir in den vergangenen zwanzig Jahren mit Experimenten, Modellen, Simulationen selbst herausgefunden haben, ist immer noch weniger als eine geschlossene Phänomenologie der Geschehnisse in und um diesen spektakulären Energietransfer zwischen Fluid und Fisch und Fluid. Wird eine Wirbelstruktur nun über die Strömungssinnesorgane des Fisches wahrgenommen oder nicht? Vielleicht. Antwortet das Wesen mit einer Körperbewegung? Ja, definitiv. Werden Wirbelstrukturen durch das Bewegungsgebaren „ergänzt“ oder „repariert“? Eventuell. Ist der beobachtbare Prozess effizient? Auf jeden Fall.

Auf jeden Fall? Nein auch das wissen wir nicht. Wenn es immer und auf jedem Fall dem Lachs gelänge, rasch Energie aus der Strömung zu extrahieren, dann würde es sich für den Grizzlibär wohl nicht lohnen, auf einem Felsen hockend dem Geschehen zu harren. Nein, für den Bär ist es lohnend zu warten. Es ist effizient, weil es dauert!

In meiner Rede habe ich viel Zeit damit verbracht, ein Modell zu rechtfertigen, das die Wandelbarkeit einer spiraligen Form mit ihrem Energiespeichervermögen in Beziehung setzt: Gestalt und Impulswirksamkeit des Lundgren-Wirbels korrelieren.

Sollte das Wesen einen Weg finden, Einfluss zu nehmen auf die Gestalt der spiraligen Form, so wird es auch in den Genuss einer nunmehr veränderten Impulsmächtigkeit kommen.

Ich bleibe infantil und stelle mir vor: „Da kommt er, der Wirbel. Ich knacke ihn von Hand. Und dann, dann werde ich geschwommen“.

Michel Felgenhauer, Berlin im März 2021

Bibliographie, Quellen und weiterführende Literatur

- [Abbo-59] Ira H. Abbott, Albert E. von Doenhoff: Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data. Dover Publications, New York 1959.
- [Albe-09] Alben, S. (2009) On the swimming of a flexible body in a vortex street. in J. Fluid Mech. (2009), vol. 635, pp. 27–45. Cambridge University Press 2009
- [Albe-06] Alben, S., Madden, P.G., Lauder, V.L. (2006) The mechanics of active fin-shape control in ray finned fishes. Journal of the Royal Society. Interface Vol.: 2007/4, S. 243-256.
- [Ande-99] Anderson, J.M. (1999) NEAR-BODY FLOW DYNAMICS IN SWIMMING FISH, The Journal of Experimental Biology 202, 2303–2327 (1999)
- [Antm-05] Antman S.S. (2005) Nonlinear problems of elasticity. 2nd edn. Springer; New York, NY.
- [BaNe-98] Barthlott, W.; Neinhuis, C.: Lotusblumen und Autolacke – Ultrastruktur pflanzlicher Grenzflächen und biomimetische unverschmutzbare Werkstoffe. Biona Report 12, Schriftenreihe der Wissenschaften und der Literatur, Mainz. Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart 1998.
- [Bann-02] Bannasch, Rudolph. Vorbild Natur. In: design report 9/02, S.20ff. Blue. C Verlag Stuttgart: 2002.
- [Bapp-99] Bappert, R. Bionik, Zukunftstechnik lernt von der Natur. SiemensForum München/Berlin und Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim (Herausgeber): 1999
- [Batc-67] Batchelor G.K. (1967) An introduction to fluid dynamics, 1st edn. Cambridge University Press; Cambridge, UK.
- [Barg-11] Bagaric, B. (2011). Modellierung, Simulation und Parametrisierung eines virtuellen Strömungskanals mit dem Programmsystem FS-Flow. Untersuchung typischer

- Szenarien endlicher Traglügel. Bachelorarbeit a.d. BeuthHS Berlin (082011).
- [Bech-93] Bechert, D.W.: Verminderung des Strömungswiderstandes durch bionische Oberflächen. In: VDI-Technologieanalyse Bionik, S. 74 – 77. VDI-Technologie-zentrum Düsseldorf 1993.
- [Bech-97] Bechert, D.W., Biological Surfaces and their Technological Application. 28th AIAA Fluid Dynamics Conference: 1997
- [Curr-25] Curry, M. (1925) Die Aerodynamik des Segels und die Kunst des Regatta-Segelns. Diessen vor München: Jos. C. Huber, 1925.
- [Cal-84] Calder, W.A. (1984) Size, Function and Life History. Harvard University Press. Cambridge 431pp.
- [Die 17-6] Dienst, Mi. (2017) Reihenuntersuchung zu elliptischen Profilkonturen für Leit- und Steuertragflächen. Zur Analyse der Strömungswirklichkeit von Surfboard-Finnen. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN(e-Book): 9783668390744, ISBN(Buch): 9783668390751.
- [Die 17-4] Dienst, Mi. (2017) Superformance of Surfboard Fins. Bionik, Leistungsähnlichkeit und affine Skalierung. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN(e-Book): 9783668377141, ISBN(Buch): 9783668377158
- [Die 17-3] Dienst, Mi. (2017) Performance und Downsizing von Surfboardfinnen. Beitrag zur Phänomenologie und Strömungswirklichkeit. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN(e-Book): 9783668374881, ISBN(Buch): 9783668374898
- [Die 17-1] Dienst, Mi. (2017) Zur numerischen Analyse einer Laborfinne. Mittelschnittverfahren und Manövrierleistung. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN(e-Book): 9783668374188, ISBN(Buch): 9783668374195.

- [Die15-7] Dienst, Mi. (2015) Dossier über die Forschung der BIONIC RESEARCH UNIT der Beuth Hochschule für Technik Berlin, GRIN-Verlag GmbH München, ISBN (e-Book): 978-3-668-02183-9, ISBN (Buch) 978-3-668-02184-6.
- [Die13-3] Dienst, Mi.(2013) Reihenuntersuchung zu Profilkonturen für Leit- und Steuerflächen von Seefahrzeugen. Datenreihe ERpL2050. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN 978-3-656-47215-5
- [Die12-US] Dienst, Mi. (2012) COMPONENTS DESIGNED TO BE LOAD-ADAPTIVE.
US-Pat. 13/517,181 (based on PCT/DE2010/075164, 19062012).
- [Die12-WO] Dienst, Mi. (2012) COMPONENTS DESIGNED TO BE LOAD-ADAPTIVE.
WO: PCT/DE2010/075164 (based on PCT/DE2010/075164, 19062012).
IPC: B63H (2012.01)
- [Die12-EU] Dienst, Mi. (2012) COMPONENTS DESIGNED TO BE LOAD-ADAPTIVE.
EU-Pat. 10809144.8 (based on PCT/DE2010/075164,).
- [Die12-DE] Dienst, Mi. (2012) Belastungsadaptiv ausgebildete Bauteile. Dt. Patent PTC/DE2010/075164, EP: 10809144.8, Offenlegung. 22062011
- [Die11-4] Dienst, Mi.(2011) Methoden in der Bionik. Die Reynoldsbasierte Fluidische Fitness. GRIN-Verlag GmbH München.
- [Die09-4] Dienst, Mi.(2009) PhysicalModellingdrivenBionics. GRIN-Verlag München.
- [Die 17-11] Dienst, Mi. (2017) Validierung einer potentialtheoretischen Berechnung mit einem 2D-CFD-Verfahren. Beitrag zur Ermittlung der Strömungswirklichkeit von Surfboardfinnen. GRIN-Verlag

GmbH München, ISBN(e-Book): 9783668447172,
ISBN(Buch): 9783668447189

[Die 17-9] Dienst, Mi. (2017) Handout zur potentialtheoretischen Untersuchung einer standardisierten Laborfinne. Beitrag zu Strömungswirklichkeit von Surfboardfinnen. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN(e-Book): 9783668442825, ISBN(Buch): 9783668442832

[Die 17-8] Dienst, Mi. (2017) Zur potentialtheoretischen Untersuchung der Strömungs-wirklichkeit einer standardisierten Laborfinne. Beitrag zur Fluidmechanik der Surfboardfinnen. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN(e-Book): 978-3-6684-3824-8, ISBN(Buch): 978-3-6684-3825-5

[Die 17-7] Dienst, Mi. (2017) Zur Phänomenologie der strömungsmechanischen Wirbelspule. Beitrag zur Strömungswirklichkeit und zum Leistungsaustrag einer Doppeldeckerkonfiguration. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN(e-Book): 978-3-668398184, ISBN(Buch): 9783668398191

[DUB-95] Dubbel, Handbuch des Maschinenbaus, Springer Verlag Berlin, 15.Auflage 1995.

[Epp1-90] Richard Eppler: Airfoil Design and Data. Springer, Berlin, New York 1990.

[Fel 21-1] Felgenhauer, Mi. (2021). Zur fraktalen Natur synthetischer Lundgren-Strukturen. On the fractal nature of synthetic Lundgren structures. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN(e-Book):9783346346193, VNR: v987098

[Fel-20] Felgenhauer, M. (2020) Die Verteilung von Induktionswirkungen Lagrange Kohärenter Objekte. Zur Topographie und Kondition von Geschwindigkeits-feldern. GRIN Verlag, München. ISBN 9783346142146

- [Fel - 19-2] Felgenhauer, Mi. (2019) BIONIK UND DIGITALE BILDVERARBEITUNG
Laterale Inhibition und Aktivierung. Grin Verlag München, ISBN(e-Book) 9783668874541, ISBN(Buch): 9783668874558
- [Fel -19-1] Felgenhauer, Mi. (2019) MATRIZENVERFAHREN ZUR DIGITALEN BILDVERARBEITUNG. Facettenaugen als Vorbild schneller Algorithmen in der Bildsynthese. Grin Verlag München
- [Fel 19-6] Felgenhauer, Mi. (2019)Über Wirbelschleifen, das Gesetz von Biot und Savart und komplexe Potentiale. About Vortex Loops. ISBN(e-Book 9783668920361, ISBN(Buch): 9783668920378
- [Fel 19-5] Felgenhauer, Mi. (2019) Anmerkungen zur Potentialtheorie und zur Fluid-mechanik. Spezielle Auslegung eines universellen Verfahrens. ISBN(e-Book): 9783668908024, ISBN(Buch): 9783668908031
- [Fel 19-4] Felgenhauer, Mi. (2019) Zur Wirbelbildung an schlanken, voll umströmten Konturen. Eine Intervention zur Wirbelmechanik mit klassischen Methoden. ISBN(e-Book) 9783668932036, ISBN(Buch): xxx9783668874558
- [Fli-02] Flindt, R. (2002) Biologie in Zahlen Berlin: Spektrum Akademischer Verl.
- Floc-09] France Floch,F. Laurens, J.M. (2009) Comparison of hydrodynamics performances of a porpoising foil and a propeller. in: First International Symposium on Marine Propulsors smp'09, Trondheim, Norway, June 2009
- [Fren-94] French, M.: Invention and Evolution: design in nature and engineering. Cambridge University Press. Cambridge 1994.
- [Fren-99] French, M.: Conceptual Design for Engineers. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio: Springer: 1999

- [Gel-10] Produktinformation, 05 2010, GELITA 69412 Eberbach.
www.gelita.com
- [Guen-98] Günther, B., Morgado, E. (1998) Dimensional analysis and allometric equations concerning Cope's rule. *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 1989
- [Gör-75] Görtler, H. Dimensionsanalyse. Berlin Springer 1975
- [Gopa-94] Gopalkrishnan, R. (1994) Active vorticity control in a shear flow using a flapping foil. in *J. Fluid Mech.* (1994), vol. 274, pp. 1-21 Cambridge University Press.
- [Gorr-17] Edgar Gorrell, S. Martin: Aerofoils and Aerofoil Structural Combinations. In: NACA Technical Report. Nr. 18, 1917.
- [Guen-66] Günther, B., Leon, B. (1966) Theorie of biological Similarities, nondimensional Parameters and invariant Numbers. *Bulletin of Mathematical Biophysics* Volume 28, 1966.
- [Gutm-89] Gutmann, W.: Die Evolution hydraulischer Konstruktionen. Verlag W. Kramer: Frankfurt am Main, 1989.
- [Hal-10] G. Haller. (2010) A variational theory of hyperbolic Lagrangian Coherent Structures. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 240(7):574–598, 2010.
- [Hal-00] G. Haller, G. Yuan Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence, Division of Applied Mathematics, Lefschetz Center for Dynamical Systems, Brown University, Providence, RI 02912, USA Received 11 February 2000;
- [Hal-21] 1. G. Haller, N. Aksamit & A.P. Encinas Bartos, Quasi-objective coherent structure diagnostics from single trajectories arXiv:2101.05903 (2021)
- [Hal-00] Haller, G., Yuan, G., Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence *Physica D.*, 147 (2000) 352–370.

- [HAL-01] Haller, G., Distinguished material surfaces and coherent structures in 3D fluid flows. *Physica D*149 (2001) 248-277.
- [HAL-05] Haller, G., An objective definition of a vortex. *J. Fluid Mech.*,525 (2005) 1–26.
- [HAL-16] Haller, G., Dynamically consistent rotation and stretch tensors from a dynamic polar decomposition. *J. Mechanics and Physics of Solids*,80 (2016) 70-93.
- [HAL-13] Haller G., Beron-Vera F. J., Coherent Lagrangian vortices: the black holes of turbulence., *J. Fluid Mech.*,731 (2013) R4.
- [HAL-16] Haller, G., Hadjighasem, A., Farazmand, M. and Huhn, F., Defining coherent vortices objectively from the vorticity. *J. Fluid Mech.* 795 (2016) 136-173.
- [HAL-20] Haller, G., Katsanoulis, S., Holzner, M., Frohnapfel, B. and Gatti, D., Objective barriers to the transport of dynamically active vector fields *J. Fluid Mech.* 905 (2020) A17.
- [HAL-15] Haller, G., Lagrangian coherent structures. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 47 (2015) 137-162
- [Hild-01] Hildebrand, M., Goslow, G.E., (2001) *Vergleichende und funktionelle Anatomie der Wirbeltiere*. Springer Verlag Berlin, N.Y.
- [Hüt-07] Hütte, 2007, 33. Auflage, Springer Verlag. S.E147
- [Hux-32] Huxley, J.S. (1932) *Problems of relative Growth*. London: Methuen.
- [Kar-35] Karman von,T. Burgess J.M. (1935) General aerodynamic theory: perfect fluids, In *Aerodynamic Theory* vol. II (cd. W. F. Durand), p. 308. Leipzig: Springer Verlag.
- [Katz-01] Joseph Katz, Allen Plotkin (2001) *Low-Speed Aerodynamics* (Cambridge Aerospace Series) Cambridge University Press; 2 edition (February 5, 2001)
- [Kra-86] Krasny, R. (1986) *Desingularization of Periodic Vortex Sheet Roll-up*. Courant Institute of Mathematical

Sciences, New York University, 251 Mercer Street, New York, New York 10012, received November 15, 1981; revised July 25, 1985

- [Kreb-08-2]Krebber, B.: "i-mech". Untersuchung der intelligenten Mechanik von Fischflossen mit Hilfe von FSI- Simulation. Forschungsbericht der Technischen Fachhochschule Berlin 2007/08
- [Kreb-08-1]Krebber, B., H.-D. Kleinschrodt und K. Hochkirch: (2008) Fluid-Struktur-Simulation zur Untersuchung intelligenter Mechanik von Fischflossen. ANSYS Conference & 26. CADFEM Users' Meeting,
- [Liao-03] Liao, J.C.; Beal, D.; Lauder, G.; Triantayllou, M. Fish Exploting Vortices Decrease Muscle Activity. In: Science 2003, S. 1566-1569. AAAS. 2003.
- [Lech-14] Lecheler, S. (2014) Numerische Strömungsberechnung Springer Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-658-05201-0
- [Liao-03] Liao, J.C.; Beal, D.; Lauder, G.; Triantayllou, M. (2003): Fish Exploting Vortices Decrease Muscle Activity, In: Science 2003, S. 1566-1569. AAAS.
- [Liao-06] Liao, J.C.; Passive propulsion in vortex wakes. in J. Fluid Mech. (2006), vol. 549, pp. 385–402. c_ 2006 Cambridge University Press
- [Lun-82]T. S. Lundgren, T.S. (1982) Strained spiral vortex model for turbulent fine structure, The Physics of Fluids 25, 2193 (1982); <https://doi.org/10.1063/1.863957>
- [Matt-97] Mattheck, C.: Design in der Natur. RombachVerlag. Freiburg 1997.
- [McCu-70] McCutchen C.W. (1970) The trout tail fin, a self-cambering hydrofoil. J. Biomech. 1970/3, S. 271–281.
- [Mial-05] B. Mialon, M. Hepperle: "Flying Wing Aerodynamics Studies at ONERA and DLR", CEAS/KATnet Conference on

- Key Aerodynamic Technologies, 20.-22. Juni 2005, Bremen.
- [Mirs-05] Mirtsch, F.; Dienst, M.: FlowBow-Artifizielle adaptive Strömungskörper nach dem Vorbild der Natur. In: Forschungsbericht der Technischen Fachhochschule Berlin 2005
- [Mof-84] Moffatt, K.H. (1984) Simple topological aspects of turbulent vorticity dynamics In: Turbulence and Chaotic Phenomena in Fluids, ed. T. Tatsumi (Elsevier) 223-230.
- [Nac-01] Nachtigall, W. (2001) Biomechanik. Braunschweig: Vieweg Verlag.
- [Nach-98] Nachtigall, W. : Bionik – Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1998.
- [Nach-00] Nachtigall, Werner; Blüchel, Kurt. Das große Buch der Bionik. Stuttgart: Deutsche Verlags Anstalt: 2000.
- [Nach-98] Nachtigall, W.: Bionik. Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1998.
- [Nach-00] Nachtigall, W.; Blüchel, K. Das große Buch der Bionik. Stuttgart: Deutsche Verlags Anstalt: 2000.
- [Oert-11] Oerteljr., H., Böhle, M., Reviol, Th. (2011) Strömungsmechanik, Grundlagen. Springer Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-8348-8110-6
- [PaBe-93] Pahl. G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, 3.Auflage. Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokio: Springer 1993
- [Pfeif-07] Pfeiffer, Rolf; Bongard, Josh (2007): How the body shapes the way we think, The MIT Press
- [Pflu-96] Pflumm, W. (1996) Biologie der Säugetiere. Berlin: Blackwell Wissenschaftsverlag.

- [Read-02] D.A. Read (2002) Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering, in Journal of Fluids and Structures 17 (2003) 163–183 Cambridge University Press
- [Rech-94] Rechenberg, Ingo. Evolutionsstrategie'94. Frommann-Holzog Verlag. Stuttgart: 1994.
- [Scha-13] Schade, H. (2013) Strömungslehre. De Gruyter Verlag. ISBN-13: 978-3110292213
- [Schü-02] Schütt, P., Schuck, H-J., Stimm, B. (2002) Lexikon der Baum- und Straucharten. Nikol, Hamburg, ISBN 3-933203-53-8
- [Sun-16] Sun, P.N., Colagrossi, A. Marrone, S., Zhang, A.M, (2016) Detection of Lagrangian Coherent Structures in the SPH framework, College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; CNR-INSEAN, Marine Technology Research Institute, Rome, Italy; Ecole Centrale Nantes, LHEEA Lab. (UMR CNRS), Nantes, France.
- Sege-87] Segel L.A. (1987) Mathematics applied to continuum mechanics. 1st edn. Dover Publications; New York, NY.
- [Siew-10] Siewert, M; Kleinschrodt, H-D; Krebber, B; Dienst, Mi. (2010) FSI- Analyse auto-adaptiver Profile für Strömungsleitflächen. In: Tagungsband, ANSYS Conference & 28th CADFEM Users' Meeting Aachen 2010.
- [Siew-11] Siewert, M; Kleinschrodt, H-D.(2011) Bionical Morphological Computation. In: Nachhaltige Forschung in Wachstumsbereichen Bd.1, Logos Verlag Berlin.
- [Stre-96] Streitlien, K. (1996) Efficient foil propulsion through vortex control, Aiaa Journal - AIAA J , vol. 34, no. 11, pp. 2315-2319, 1996
- [Tham-08] Siekmann, H.E., Thamsen, P. U. (2008) Strömungslehre Grundlagen, Springer Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-73727-8

- [Tho-59] Thompson, D'Arcy, W. (1959) *On Growth and Form*. London: Cambridge University Press. (Neuaufgabe der Originalschrift 1907)
- [Tho-92] Thompson, D W., (1992). *On Growth and Form*. Dover reprint of 1942 2nd ed. (1st ed., 1917). ISBN 0-486-67135-6
- [Tria-95] Triantafyllou, M. (1995): Effizienter Flossenantrieb für Schwimmroboter, *Spektrum der Wissenschaft* 08-1995, S. 66–73, Wiss. Verlagsges.mbH, Heidelberg 1995.
- [Tria-95] Triantafyllou, M., Triantafyllou, G. (1996): An Efficient Swimming Machine. *Scientific American*, March 1996. p.64-70.
- [Tria-95] Triantafyllou, M., Triantafyllou, G. (1996): An Efficient Swimming Machine. *Scientific American*, March 1996. p.64-70.
- [Tria-02] Triantafyllou, M. (2002) Vorticity Control in Fish-like Propulsion and Maneuvering, *INTEGR. COMP. BIOL.*, 42:1026–1031 (2002)
- [Tria-95] Triantafyllou, M.: Effizienter Flossenantrieb für Schwimmroboter. In: *Spektrum der Wissenschaft* 08-1995, S. 66–73. Spektrum der Wissenschaft- Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg 1995.
- [Tria-87] Triantafyllou M., Kupfer K., Bers A. (1987) Absolute instabilities and self-sustained oscillations in the wakes of circular cylinders. *Physical Review Letters* 59, 1914–1917. [ADSCrossRefGoogle Scholar](#)
- [Tria-91] Triantafyllou M., Triantafyllou G. S., Gopalskrishnan R. (1991) Wake Mechanics for Thrust Generation in Oscillating Foils, *Physics of Fluids A*, 3 (12), pp. 2835–2837. [ADSCrossRefGoogle Scholar](#)
- [Tria-92] Triantafyllou M., Triantafyllou G. S., Grosenbaugh M. A. (1992) Optimal Thrust Development in Oscillating Foils

with Application to Fish Propulsion, Journal of Fluids and Structures (Accepted for Publication)[Google Scholar](#)

- [Vos-15-2] M. Voß, H.-D. Kleinschrodt, Mi. Dienst: "Experimentelle und numerische Untersuchung der Fluid-Struktur-Interaktion flexibler Tragflügelprofile", Resarch Day 2015 - Stadt der Zukunft Tagungsband - 21.04.2015, Mensch und Buch Verlag Berlin, S. 180- 184, Hrsg.: M. Gross, S. von Klinski, Beuth Hochschule für Technik Berlin, September 2015, ISBN:978-3-86387-595-4.
- [Vos-15-1] M. Voss, P.U. Thamsen, H.-D. Kleinschrodt, Mi. Dienst (2015): "Experimetal and numerical investigation on fluid-structure-interaction of auto-adaptive flexible foils", Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'15), Budapest, Ungarn, 1.-4. September 2015, ISBN (Buch): 978-963-313-190-9.
- [Vos-15-2] M. Voss, (2015) Experimentelle und numerische Untersuchung flexibler Tragflügelprofile. Dissertation, Technische Universität Berlin 2015.
- [Zie - 72] Zierep, J. (1972) Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln der Strömungslehre.

Michel Felgenhauer ist das Pseudonym des Motorenbauers Michael Dienst aus Wiesbaden. Ich lebe und arbeite in Berlin, bin Sprecher der Bionic Research Unit der Berliner Hochschule für Technik und war mehr als zwei Jahrzehnte Dozent für Bionic Engineering an der UDK Berlin und am Industrial Design Institut der Hochschule Magdeburg.

Martha Felgenhauer stirbt 1943 als junge Frau in Ziegenhals, Schlesien. Die sie kannten sagen, wir seien wesensverwandt. Gelegentlich also erzähle ich meiner Großmutter Geschichten aus der fröhlichen Wissenschaft. / Berlin im März 2021

Bildanhang:

Erklärung:

Alle graphischen Darstellungen sind frei von Rechten Dritter. Alle Bilder und Skizzen sind eigene Darstellungen.

Alle Berechnungsprogramme sind eigene Entwicklungen. Alle Berechnungen und Simulationsergebnisse erfolgen mit eigenen Berechnungsprogrammen. Alle Computercodes der Berechnungsprogramme sind eigene Entwicklungen.

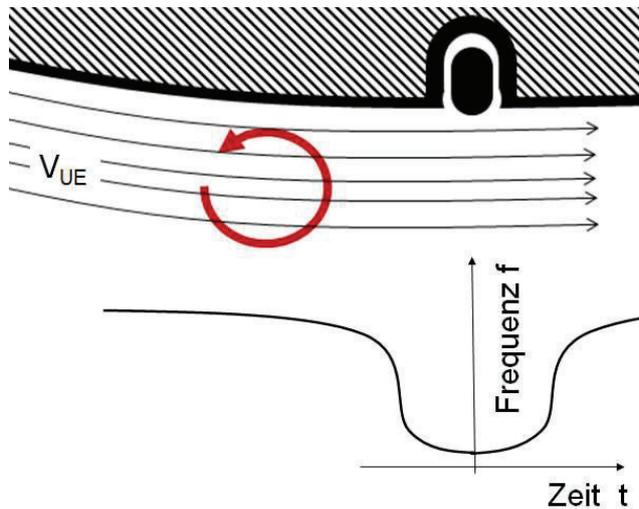


Abb.1: Szenario I: Eine Wirbelstruktur streicht backbordseitig an einem Körper vorbei und wird von einem singulären Detektor als Signal-Delle erkannt.

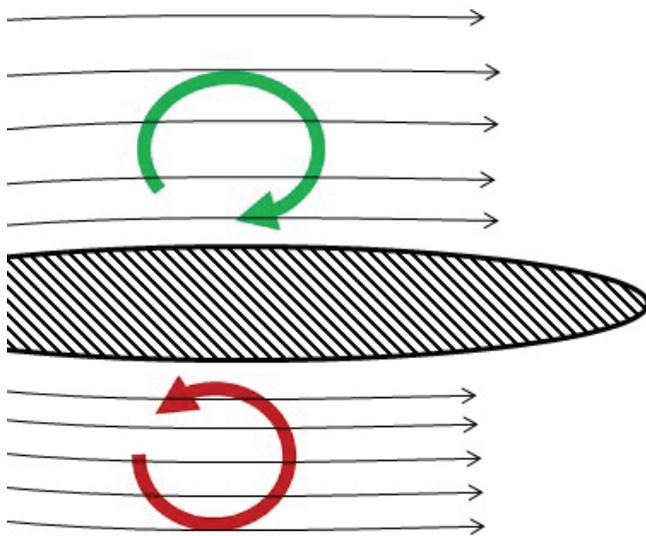


Abb.2: Szenario III. Möglicherweise wird die Wirbelszenerie von einem Lebewesen als eine linksseitige und eine rechtsseitige Frequenzdelle registriert.



Abb.3: Der Nachlauf einer Störung in der Strömung. Die Karman'sche Wirbelstraße und ein signifikantes Teilelement dieser.

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b4/Vortex-street-animation.gif/220px-Vortex-street-animation.gif>

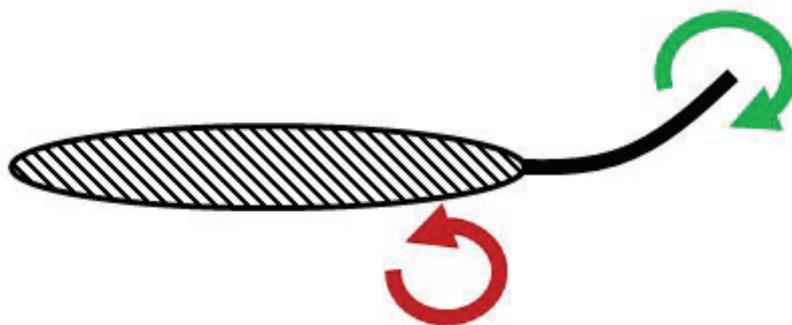


Abb.4: Der die Wirbelstruktur ergänzende Flossenschlag.

Wirbel, Flossen und Kamele



Abb. 5a. Tafelbild im April 2017.



Abb.5: 2017: Impressionen eines Abschieds. Oben, Abb.5a: Das Tafelbild Wirbelpuleneffekt; seit 1998 wurde die Tafel offenbar nicht mehr gewischt. Unten: Leif setzt sich für uns ein letztes Mal auf einen Stuhl mit „seinem“ Fin Ray Effect®. Die Schautafel erklärt das Phänomen der belastungsadaptiven Verformung (links im Bild).

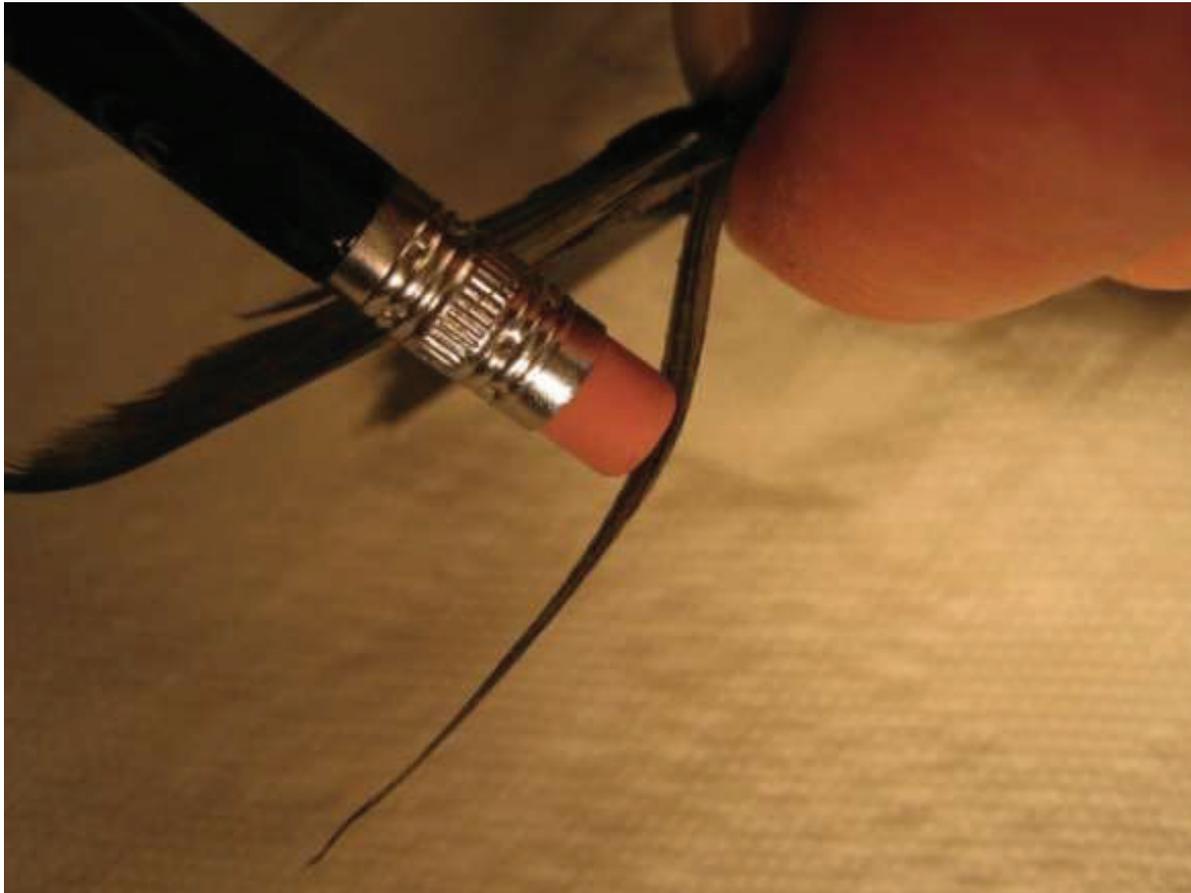


Abb.6: Das nichtorthodoxe Beaufschlagungs-Bewegungs-Gebaren einer Makrelenfinne. Fotografische Darstellung, Mi. Dienst (2008)

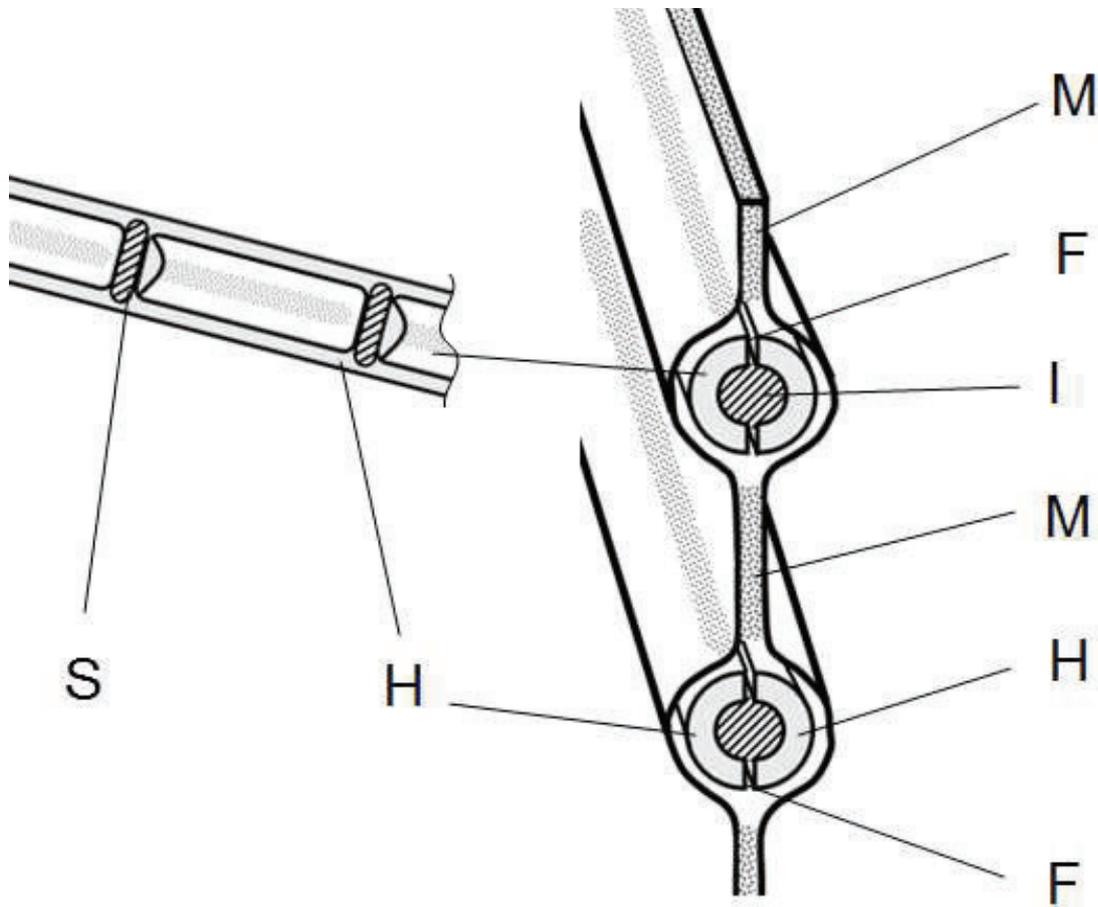


Abb.7: Schematische Darstellung einer Flossenmembran⁸⁰. Steg S, Halbtube H, Membran M, Fuge F und Inlet I.

⁸⁰Dienst, Mi.(2013) About the nonorthodox Behavior of Fish Fins. IntelligentMechanics (i-mech) in Nature and Design, GRIN-Verlag GmbH München, ISBN 978-3-656-44320-9.

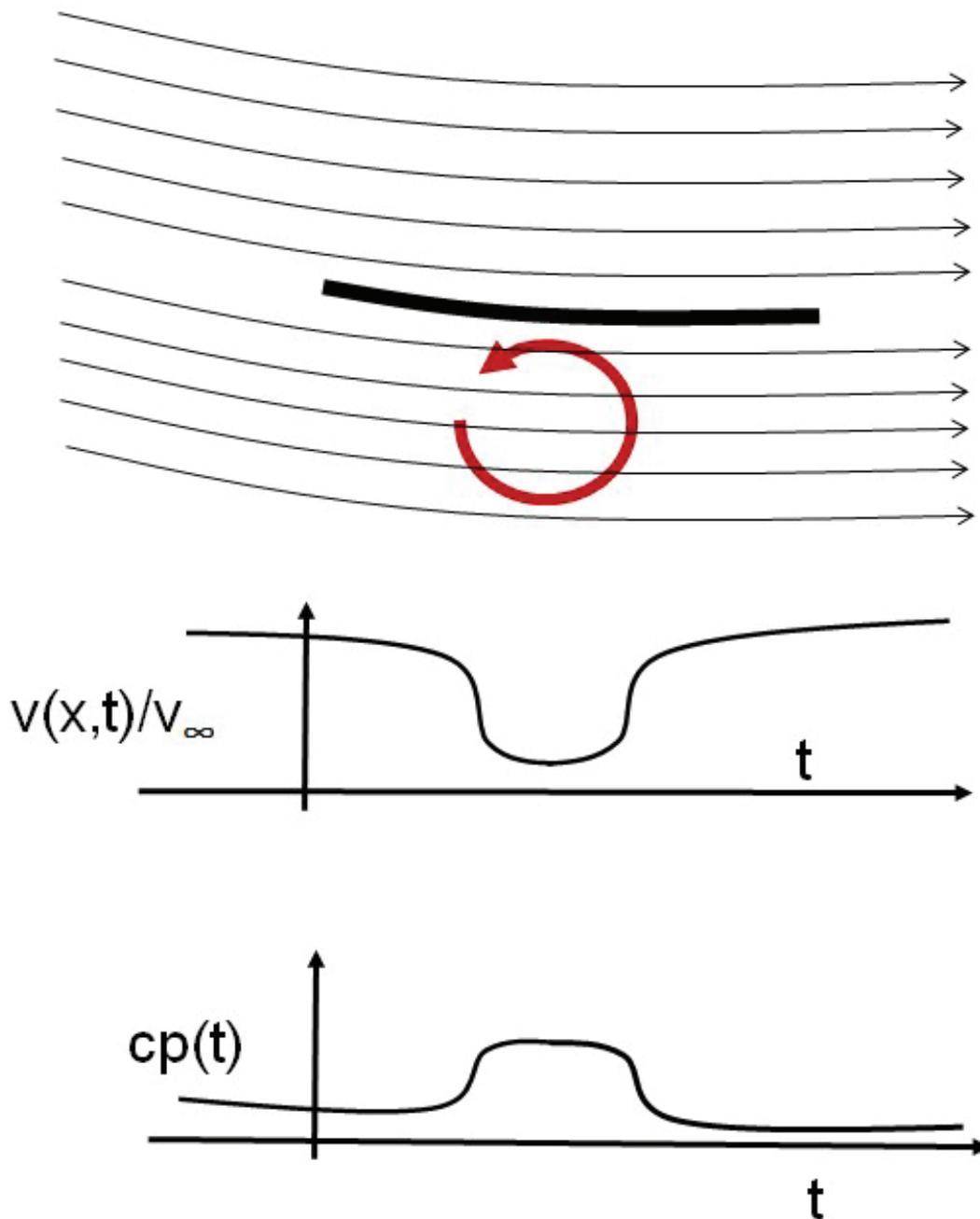


Abb.8: Die generalisierte wandnahe Geschwindigkeit $v(x,t)/v_\infty$ und der Druckbeiwert c_p sind komplementär.

Orthodox und Nichtorthodox

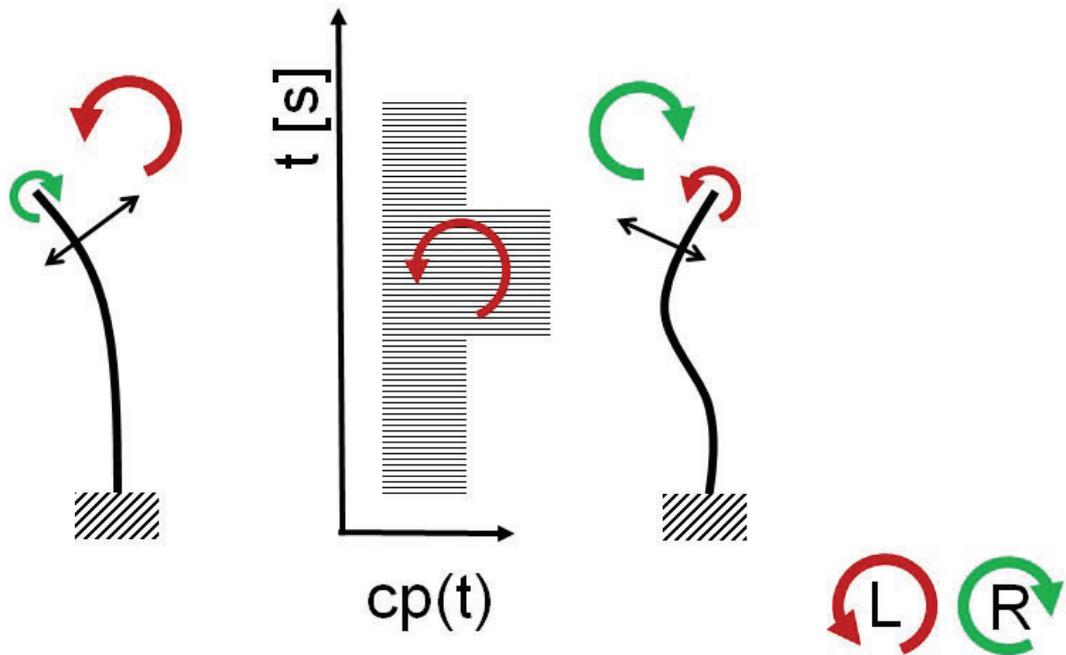


Abb.9: Eine orthodoxe und eine nichtorthodoxe Balkenstruktur (FinRay) werden von einer wirbelbehafteten Strömung beaufschlagt (transienter Druckbeiwert $cp(t)$).



Abb. 10: Camels.

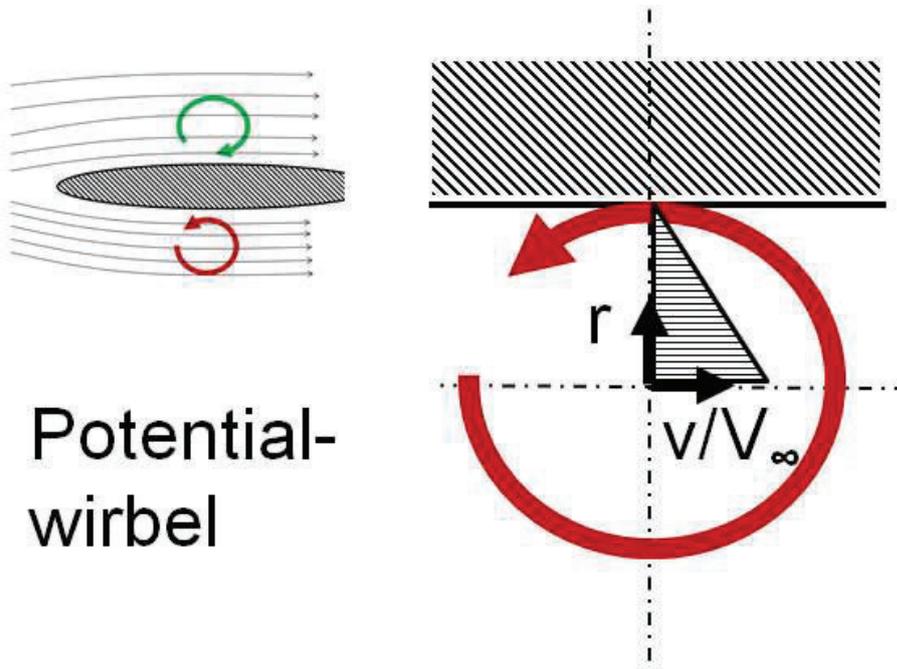
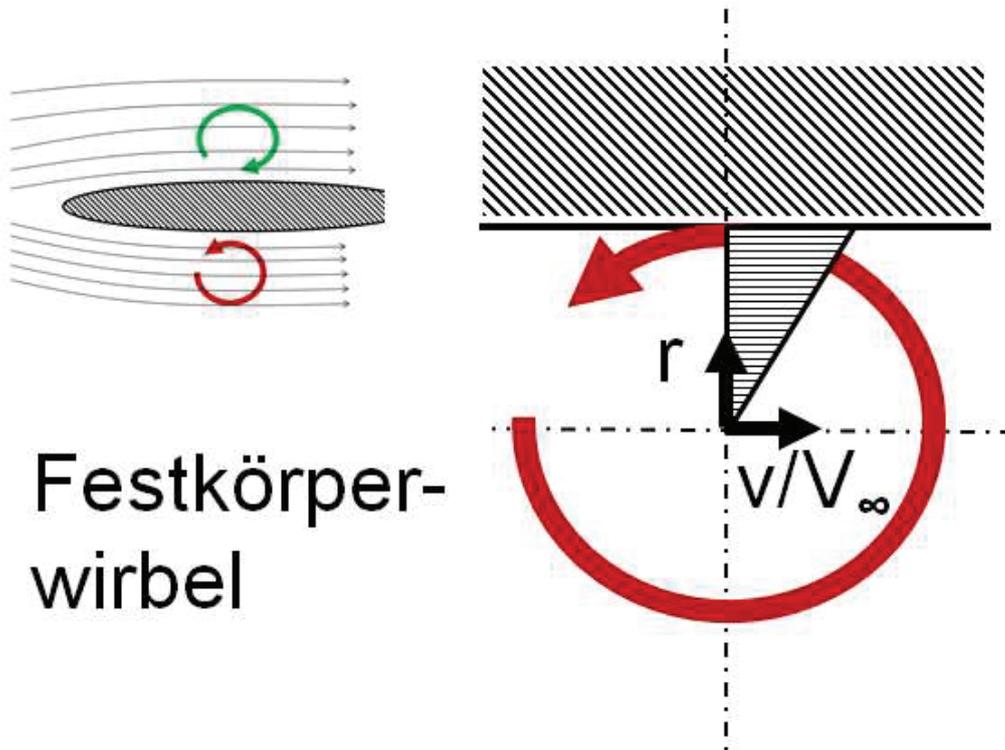


Abb.12: Gradient der generalisierten Geschwindigkeit in einem Potentialwirbel. Zur Kraftgröße: $c_p(r,t) = 1 - (v(r)/v_\infty)^2$



Festkörper-
wirbel

Abb.13: Gradient der generalisierten Geschwindigkeit in einem Festkörperwirbel. Zur Kraftgröße: $c_p(r,t) = 1 - (v(r)/v_\infty)^2$

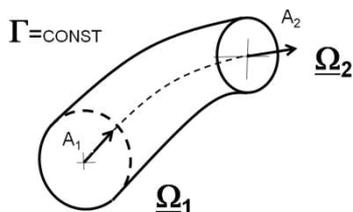


Abb.14: Wirbelfaden

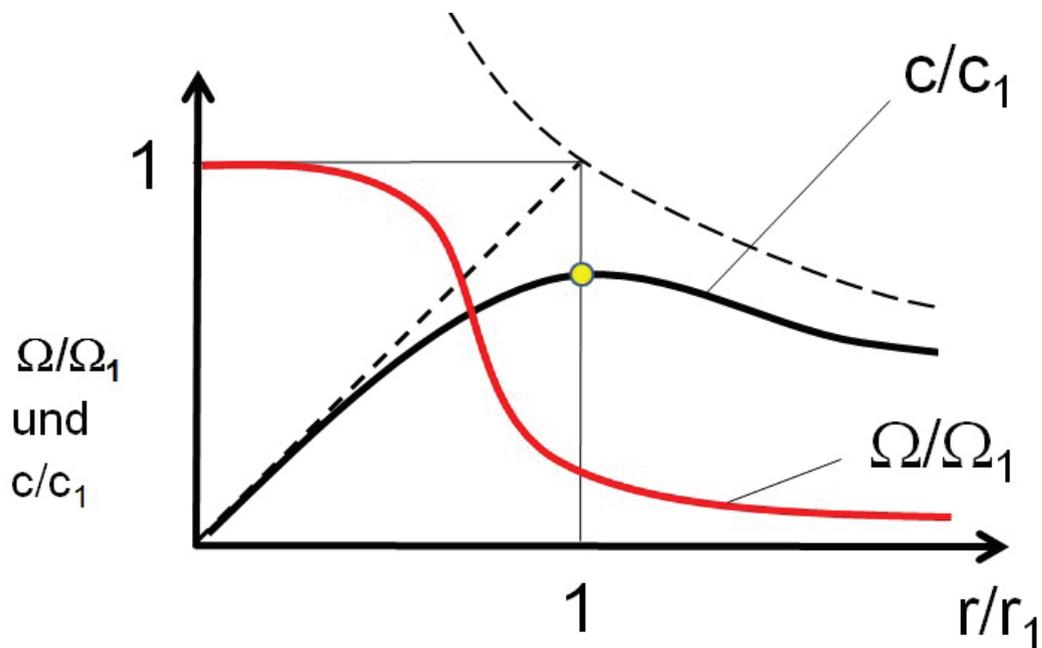


Abb.15: Geschwindigkeitsverteilung und Zirkulationsstärkeverteilung (rot) über einen generalisierten Radius beim Rankine-Wirbel.

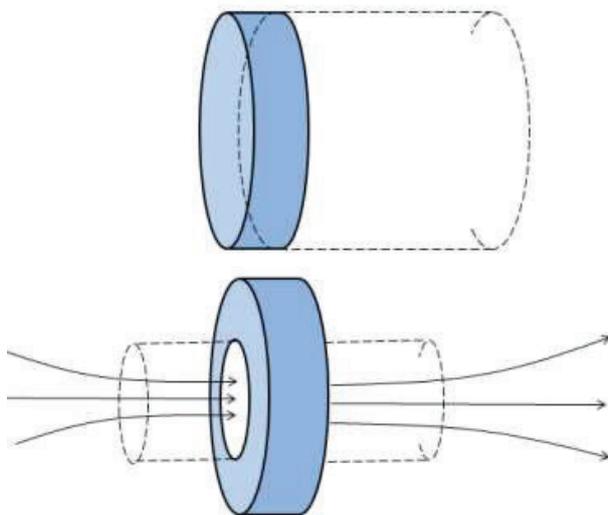


Abb.16: Wirbelspule

Wirbel, Flossen und Kamele

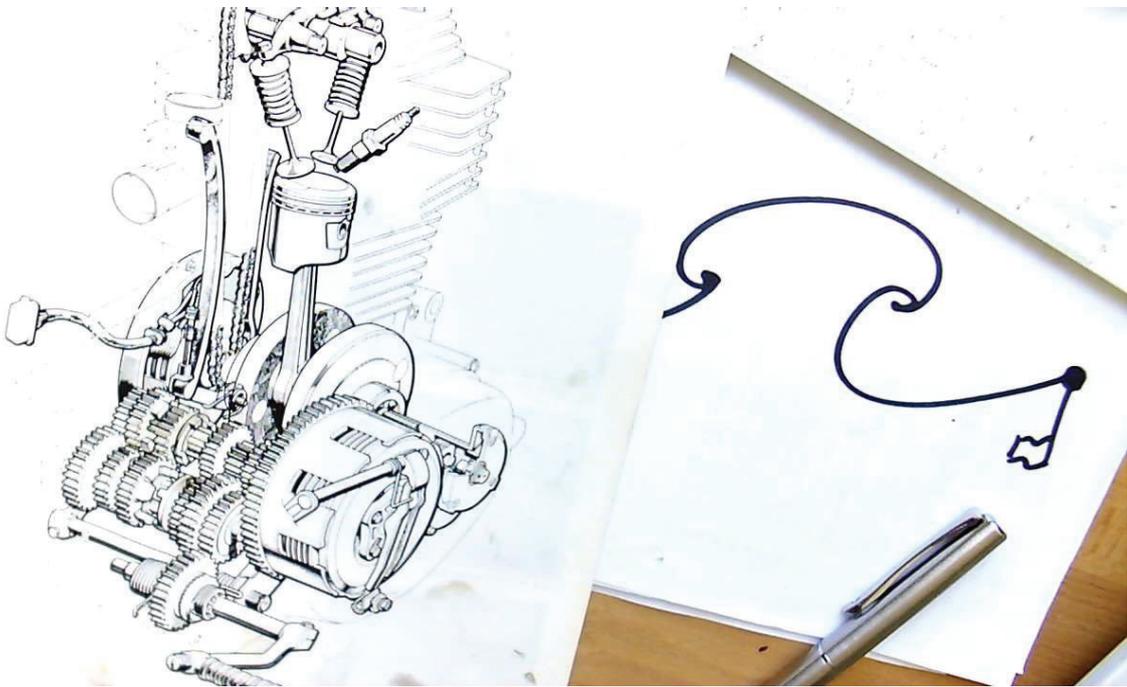


Abb. 17: Schreibtischbild



Abb.18: Schnürsenkel, Nudeln, Karman oder so.. © Felgenhauer 2018

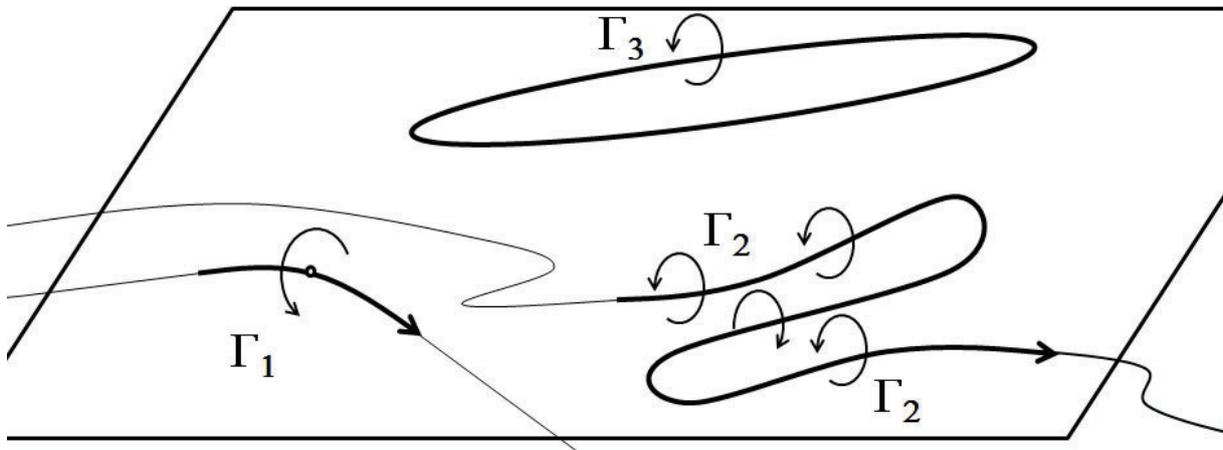


Abb.19: Wirbelfäden und deren zugehörige Zirkulation Γ [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] an unterschiedlichen Orten in einer Ebene. © Mi. Felgenhauer 2018.

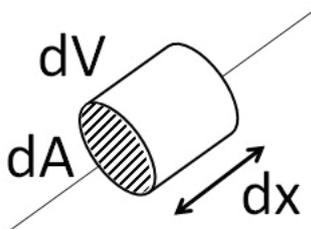


Abb.20: Volumenelement

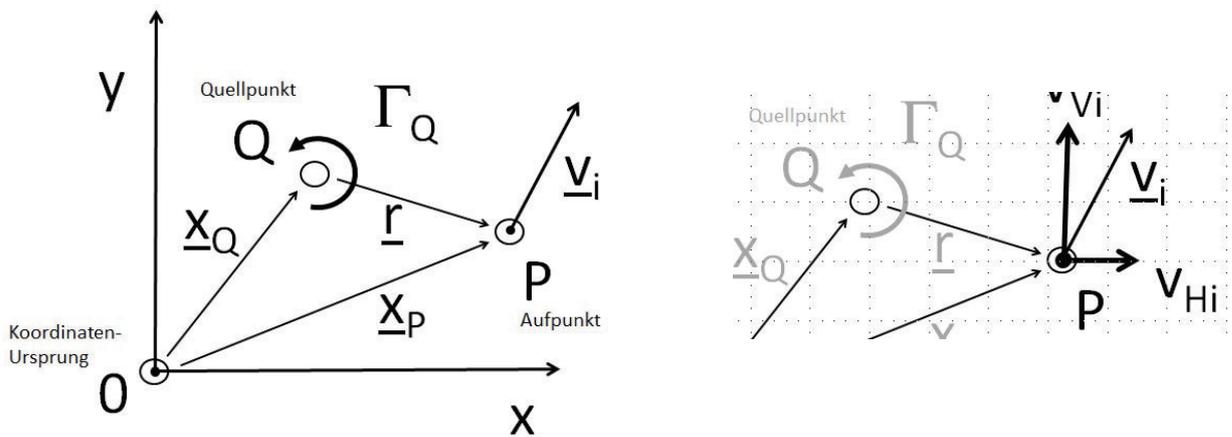


Abb.21: Das Wirbelfadenelement an einem beliebigen Punkt Q im Strömungsfeld; Aufpunkt P und vektorielle Geschwindigkeit \underline{v} dort.

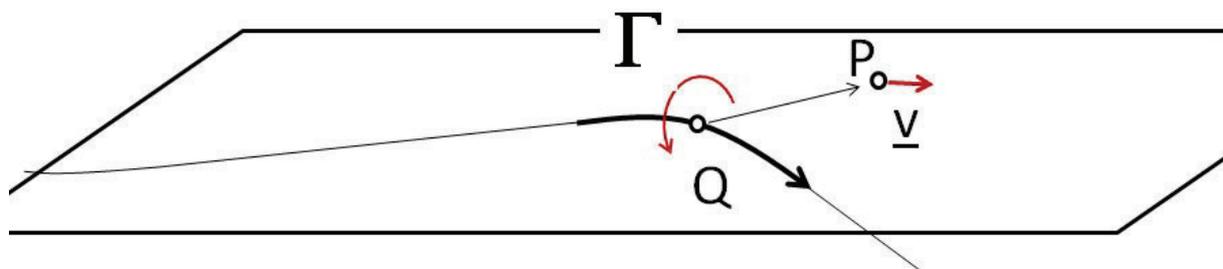


Abb.22: Verallgemeinertes Wirbelfadenelement an einem Punkt Q im Strömungsfeld; Aufpunkt P und vektorielle Geschwindigkeit \underline{v} dort.

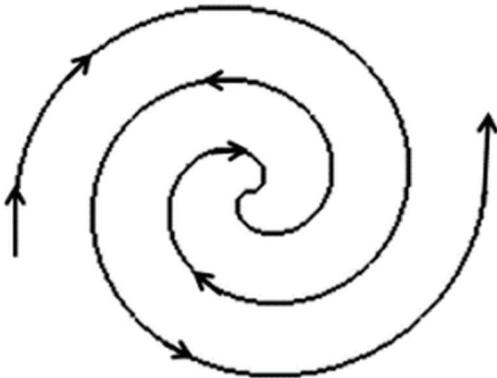


Abb.23: Lundgren-Form

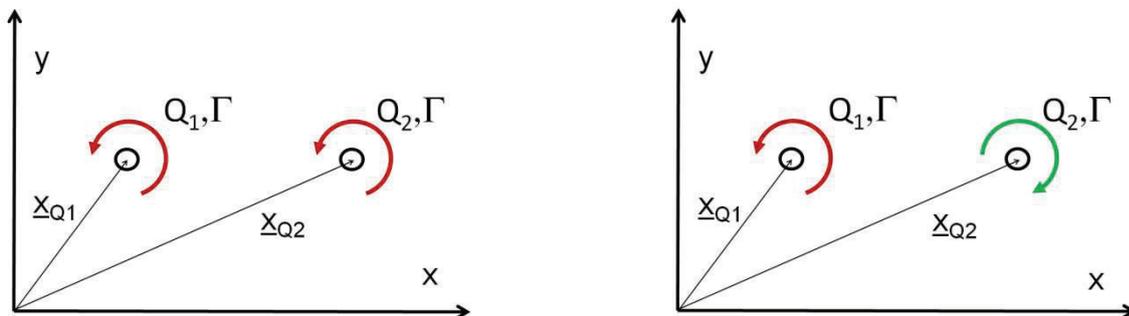


Abb.24: LANG-reichweitige Wechselwirkung zweier Lagrange kohärenter Wirbelfäden in der (x,y) Ebene. Die Zirkulationsrichtung ist gleich (links im Bild). LANG-reichweitige Wechselwirkung zweier Lagrange kohärenter Wirbelfäden in der (x,y) Ebene. Die Zirkulationsrichtung ist verschieden (rechts im Bild).

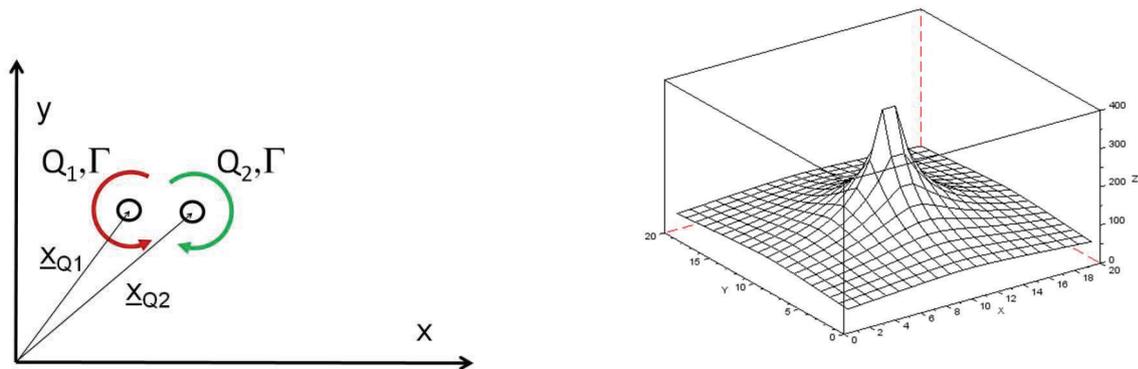


Abb.25: KURZ-reichweitige Wechselwirkung zweier Lagrange kohärenter Wirbelfäden in der (x,y) Ebene. Die Zirkulationsrichtung ist verschieden. Ein Teil der kinetischen Energie $E \sim c^2$ [J] bleibt nicht verwertbar verborgen (Energieäquivalent, rechts im Bild).

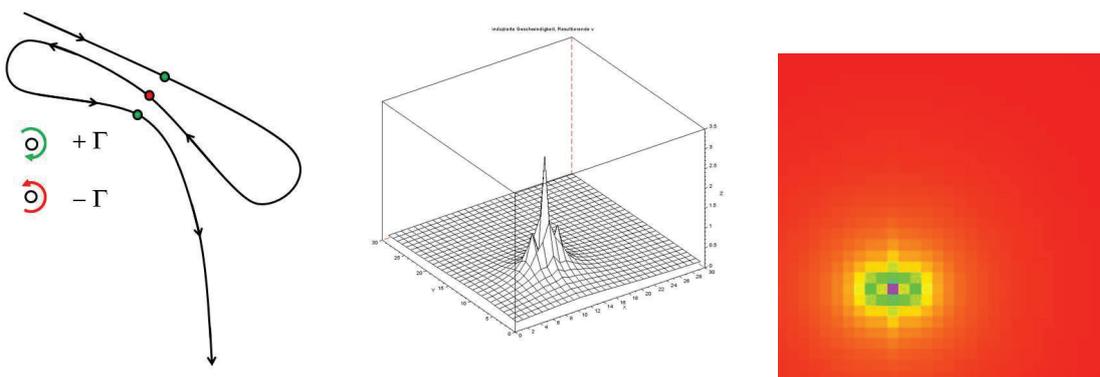


Abb.26: Drei eng benachbarte Quellpunkte eines LCO (links), die resultierende induzierte Geschwindigkeit \underline{v} (mittig und rechts) in einer Schnittebene.

Wirbel, Flossen und Kamele

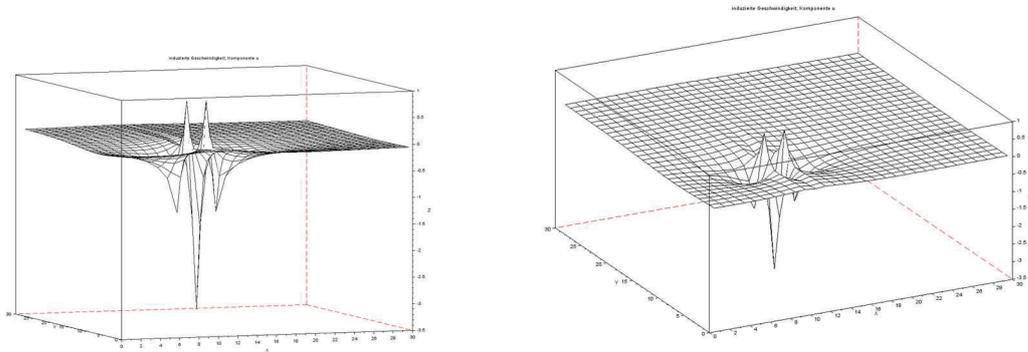


Abb.27: Drei eng benachbarte Quellpunkte eines LCO und die horizontale Komponente u der induzierten Geschwindigkeit in einer Schnittebene in zwei Perspektiven .

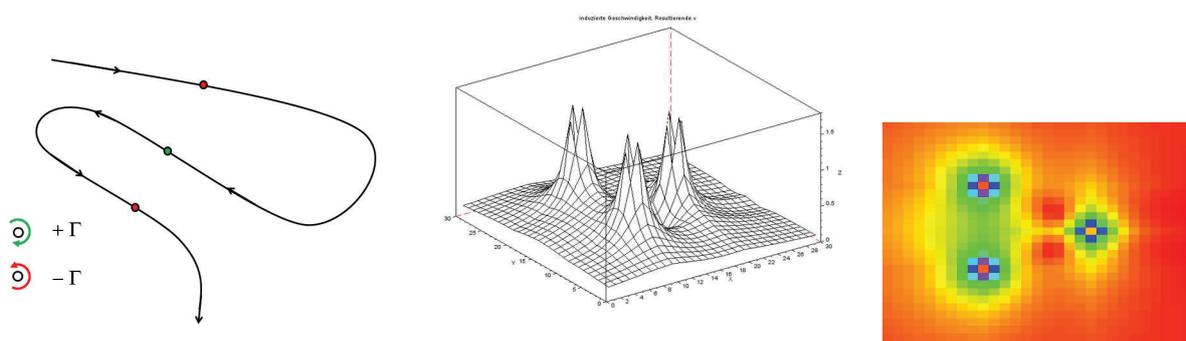


Abb.28: Drei weitreichig benachbarte Quellpunkte eines LCO (links), Resultierende Induzierte Geschwindigkeit \underline{v} (mittig und rechts) in einer Schnittebene.

Wirbel, Flossen und Kamele

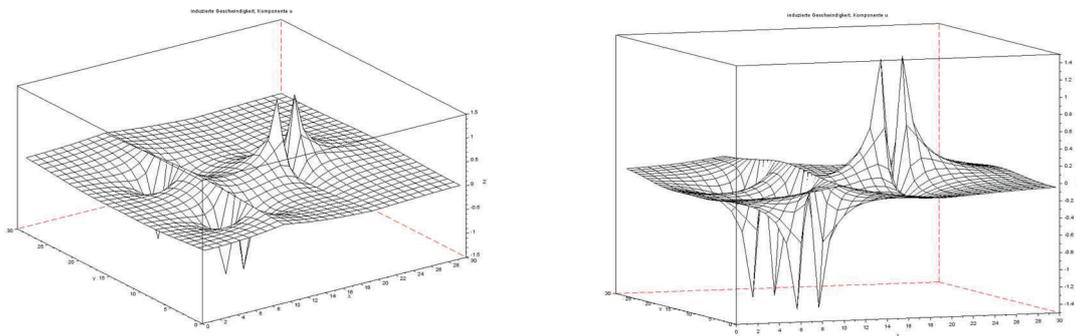
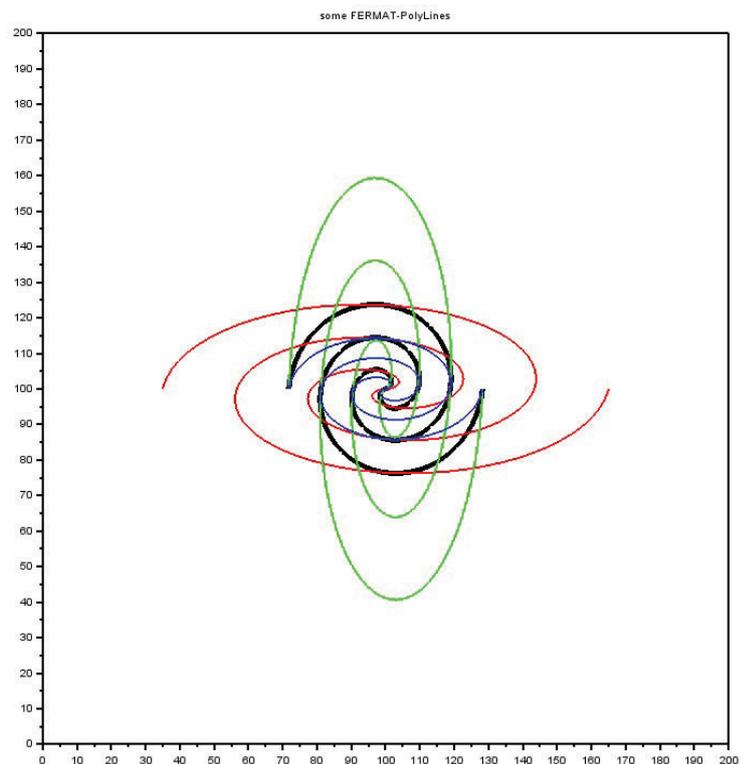


Abb.29: Drei weitreichig benachbarte Quellpunkte eines LCO und die horizontale Komponente u der induzierten Geschwindigkeit in einer Schnittebene und in zwei Perspektiven.

Abb.30: Variationen einer ebenen Lundgren-Form. SCHWARZ: Phänomenologie der Fermat-Spirale (D-LCO); ROT: Transformation in X-Richtung (Dehnung, LD-LCO); GRÜN: Transformation in Y-Richtung (Dehnung, LD-LCO); BLAU: Transformation in Y-Richtung (HD, Stauchung). Die Transformatierten haben die gleiche Dimension und besitzen in der Ebene gemeinsame Punkte. (Eigene Darstellung Mi. Felgenhauer 2020).



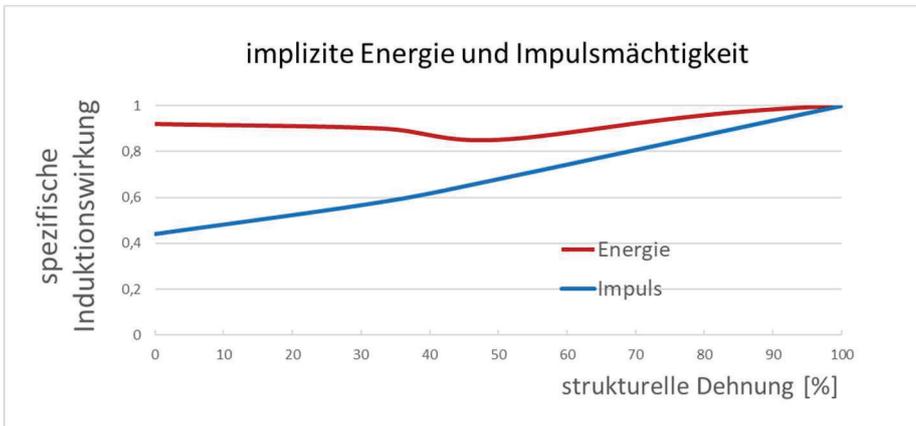


Abb. 31: Spezifische implizierte Energie und verfügbare Impulswirksamkeit; aufgetragen über die geometrische Dichte der Struktur.

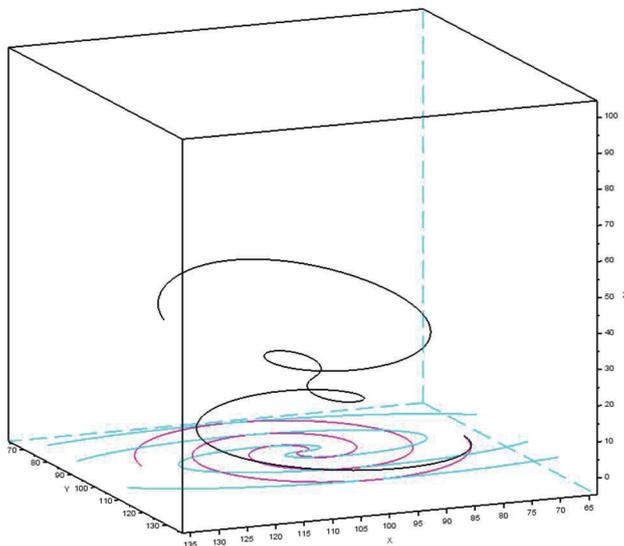


Abb.32: Homomorphe Variationen der Lundgren-Form. Die Transformierten haben gleiche Dimension. (eigene Darstellung Mi. Felgenhauer 2020).



Abb.33: Der Halbschnabelhecht (*Dermogenys pusilla*) ist ein Fisch aus der Familie Zenarchopteridae. Eher gelassen im Kraut (links) und nahe an der Wasseroberfläche auf Beute lauernd (rechts im Bild). In freundlicher Überlassung, Aquazoo Löbbecke Museum Düsseldorf.

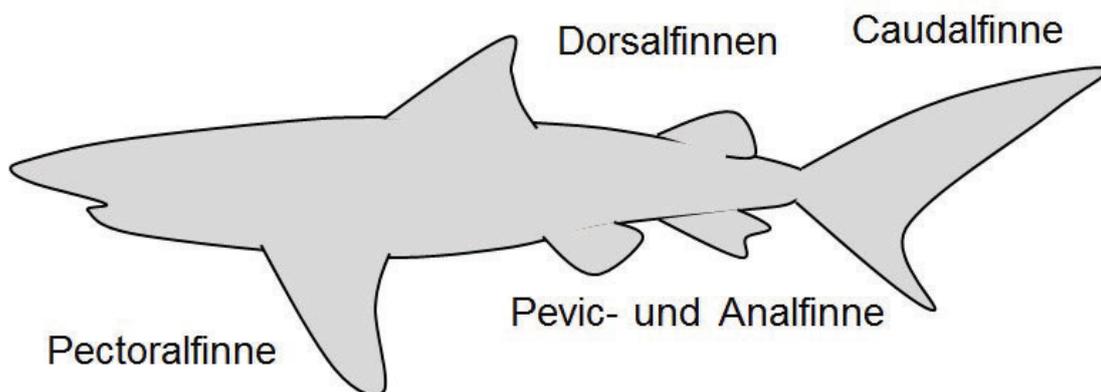


Abb.34: Flossensysteme eines Knorpelfisches. Der Pectoralflosse, ihr entspricht der „Wirbeltierhand“, werden in erster Linie steuernde und stabilisierende Aufgaben zugeschrieben.



Makrele

Riesenhai

Dornhai

Tunfisch

Schwertfisch

Hecht

Abb.35:
Formensprache der Pectoralfinnen.

Wirbel, Flossen und Kamele

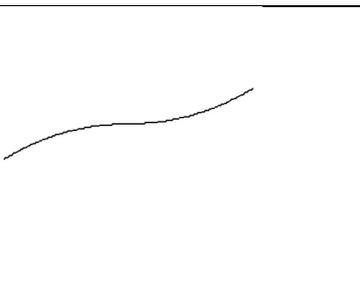
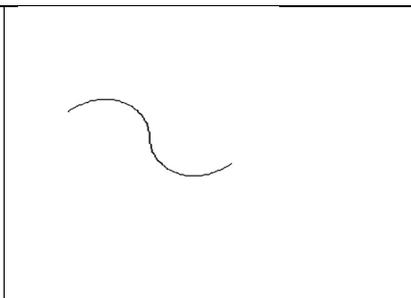
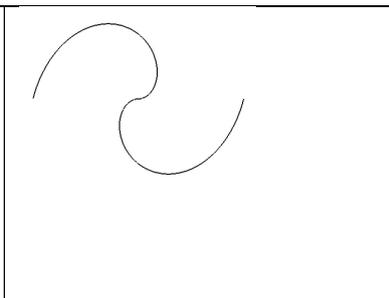
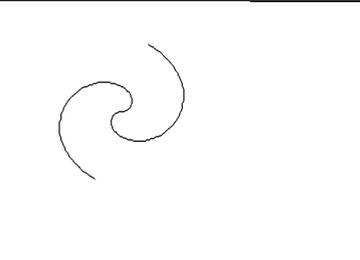
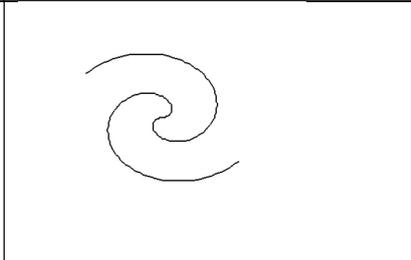
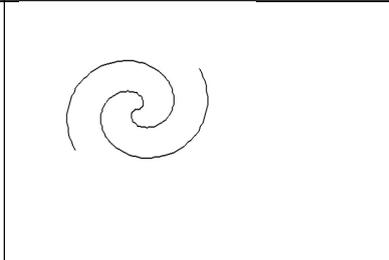
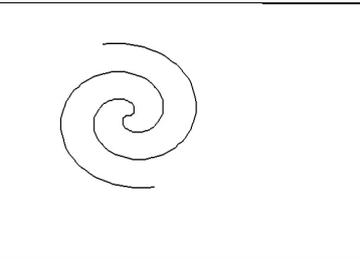
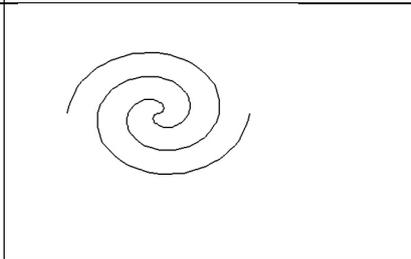
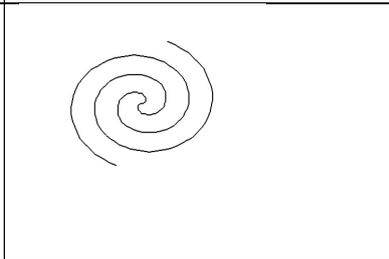
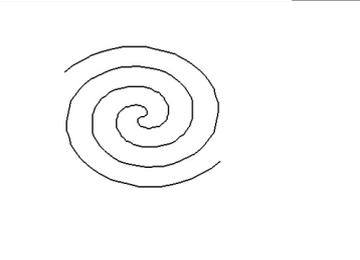
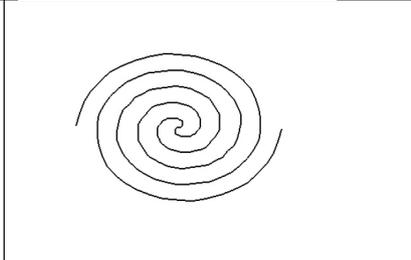
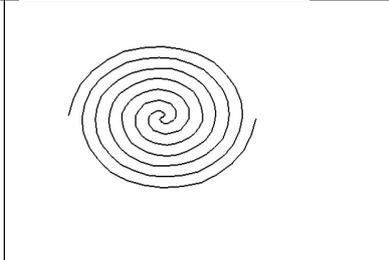
		
N=0.05 $\text{fracD} = 1.08$	N=0.2 $\text{fracD} = 1.11$	N=0.5 $\text{fracD} = 1.13$
		
N=0.7 $\text{fracD} = 1.303$	N=0.9 $\text{fracD} = 1.42$	N=1.1 $\text{fracD} = 1.446$
		
N=1.3 $\text{fracD} = 1.481$	N= 1.5 $\text{fracD} = 1.50$	N=1.7 $\text{fracD} = 1.513$
		
N=1.9 $\text{fracD} = 1.524$	N=2.5 $\text{fracD} = 1.562$	N=4.5 $\text{fracD} = 1.69$

Abb.36: Fraktale Dimension von Lundgren-Formen (nach Felgenhauer(2021). On the fractal nature of synthetic Lundgren structures).

Wirbel, Flossen und Kamele



Abb. 33: M18
Dromader.



Abb.34.
..uü,
patsch,
wusch!
(von oben nach unten)

BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei www.GRIN.com hochladen
und kostenlos publizieren

