

ROBERT-WICHARD-POHL-PREIS

Physik mit Warp-10

Aus der Science-Fiction-Serie „Star Trek“ lassen sich spannende physikalische Lehren ziehen.

Metin Tolan

Seit über fünfzig Jahren „dringt die Enterprise in Galaxien vor, die nie ein Mensch zuvor gesehen hat“. Ihre Mission ließ sich bisher in 726 Fernsehfolgen und 13 Kinofilmen verfolgen. Keine andere Fernsehserie kann solch einen weltweiten, lang anhaltenden Erfolg verbuchen wie Star Trek. Und dabei bietet sie auch noch einen Lehrfilm über Physik.

Von Anfang an begeisterte die amerikanische Fernsehserie Star Trek ihre Fans nicht nur durch die spannenden Erlebnisse der Raumschiffbesatzungen unter Captain Kirk, Picard & Co., sondern auch durch die genaue Beschreibung physikalischer Aspekte und der Zukunftstechnik. Captain Kirk ließ nicht einfach „Gas“ geben, wenn die Enterprise zu einer ihrer vielen Reisen aufbrach, sondern befahl, das Raumschiff auf „Warp-Geschwindigkeit“ zu beschleunigen. Der Name des dafür nötigen Warp-Antriebs löst sofort Spekulationen über den Antriebsmechanismus aus – wie so viele andere erstaunliche Erfindungen an Bord der Enterprise wie das Beamen oder der Replikator. Immer drängen sich die Fragen auf „Wie funktioniert das?“ bzw. „wie könnte das funktionieren?“ Wenn in der Serie von „Neutrinos“ oder „Antimaterie“ die Rede ist, haben wir es mit Begriffen zu tun, die nicht nur heutigen Physikern bestens vertraut sind. Doch der Warp-Antrieb dürfte keiner uns bekannten Technologie entsprechen. Daher liegt es nahe, die Physik bei Star Trek, die sich zu einem Markenzeichen der Serie entwickelt hat, anhand dieses Beispiels einmal genauer unter die Lupe zu nehmen [1, 2].

Wie man in der Serie erfährt, besitzt die Enterprise zunächst einen „Impuls-Antrieb“, der zum Einsatz kommt, wenn nur „geringe“ Distanzen zurückzulegen sind. Dabei handelt es sich um einen „normalen“ Antrieb, der wie bei Raketen auf dem Rückstoßprinzip basiert. Heutige Impuls-Antriebe sind sicher ungeeignet, um die gigantischen Distanzen zwischen den Sternen unserer Milchstraße zu überbrücken. Doch bis zum 22. Jahrhundert, in dem sich erstmals ein Raumschiff mit Namen Enterprise auf die Reise macht, vergeht ja noch etwas Zeit. Bis dahin, so ließe sich argumentieren, könnte beispielsweise ein Supertreibstoff entwickelt worden sein oder neuartige Ionenantriebe, die Energie aus der Kernfusion gewinnen. Schließlich dreht es sich um Science Fiction und nicht um das, was heute schon möglich ist. Doch die Macher von Star



Das Raumschiff Enterprise gehört zu den Ikonen des Science-Fiction-Genres. Nicht zuletzt die zugrundeliegende Antriebstechnik hat Anlass zu ernsthaften physikalischen Spekulationen gegeben.

Trek haben nicht nur fantasievoll spekuliert, sondern Wert darauf gelegt, die Naturgesetze für die Technik der Zukunft nicht zu stark zu „verbiegen“. Daher ist die Frage erlaubt, warum der „Warp-Antrieb“ statt eines „sehr schnellen“ Impuls-Antriebs zum Einsatz kommt, um die gigantischen Distanzen zwischen den Sternen zu überbrücken.

Wie schnell die Zeit vergeht

Nehmen wir einmal an, die Enterprise könnte sich fast mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Dann wäre jede Reise zu fernen Sternen aufgrund der Zeitdilatation der Speziellen Relativitätstheorie (Stichwort „Zwillingsparadoxon“) für die Besatzung eine Reise in die ferne Zukunft der Erde. Kirk und Spock würden also nach einem galaktischen Abenteuer zwar wieder zurückkehren, doch diejenigen, die sie auf die Reise geschickt hatten, wären schon seit Jahrhunderten tot. Eine zentral regierte „Vereinigte Föderation der Planeten“ wie im Star-Trek-Universum könnte bei solch einem „Zeitchaos“ niemals funktionieren. Dem Antrieb der Enterprise und der anderen Raumschiffe der Sternenflotte

Prof. Dr. Metin Tolan,
Technische Universität Dortmund,
Fakultät Physik & DELTA, Experimentelle Physik I, Otto-Hahn-Straße 4,
44221 Dortmund –
Preisträgerartikel
anlässlich der Verleihung des Robert-Wichard-Pohl-Preises
2017 auf der DPG-Jahrestagung in Münster

kommt also eine fundamentale Rolle zu, um die „zeitliche Ordnung“ aufrecht zu erhalten. Der Warp-Antrieb muss das Zwillingsparadoxon vermeiden und dafür sorgen, dass die Zeit für die Raumschiffbesatzung wie für die Menschen auf der Erde gleich vergeht.¹⁾

Die Macher der ersten Star-Trek-Serie machten sich die Mühe, einen Physikstudenten der Universität von Los Angeles nach einem groben Konzept für den Warp-Antrieb zu fragen. Der Name dieses Studenten ist nicht überliefert, aber die 50 Dollar Honorar, die er angeblich erhielt, waren gut investiert. Ausgangspunkt ist Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, welche die Gravitation auf die geometrische Struktur des Raumes zurückführt: Masse bzw. Energie krümmen den Raum. Allerdings fallen solche Verzerrungen des Raumes in der Regel extrem klein aus. So krümmt unsere Sonne mit ihrer gewaltigen Masse den Raum in ihrer unmittelbaren Nähe nur so stark,

das ein Lichtstrahl,

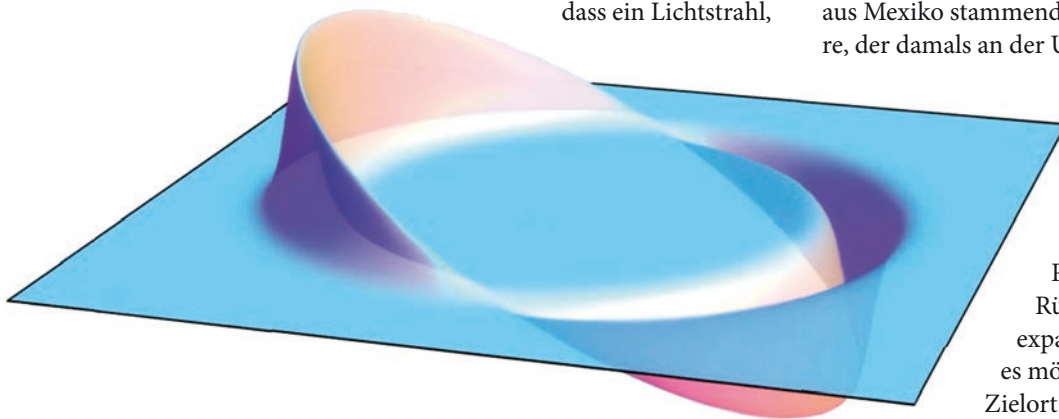


Abb. 1 Die von Miguel Alcubierre entwickelte „Warp-Blase“ mit ihren Regionen der kontrahierten und expandierten Raumzeit ermöglicht prinzipiell eine überlichtschnelle Fortbewegung [3].

der sehr dicht an ihr vorbei läuft, nur um ein halbes tausendstel Grad aus seiner Bahn abgelenkt wird. Dennoch ist das Prinzip der Raumkrümmung die Grundlage des Warp-Antriebs.

Die Enterprise könnte beispielsweise die vier Lichtjahre von der Erde zu Proxima Centauri mit einem konventionellen Raketenantrieb zurücklegen. Doch das wäre entweder zu langsam oder führte zu Zeitverzerrungen. Der Warp-Antrieb ist prinzipiell so konzipiert, dass er eine gigantische Energiemenge freisetzt, um den Raum zwischen der Erde und dem Stern stark zusammenzustauchen („zu kontrahieren“). Die Enterprise durchfliegt diesen kontrahierten Raum; erst wenn sie fast am Zielort angekommen ist, wird der Raum genauso wieder expandiert. Da Kontraktion und Expansion des Raumes aber gar nichts mit einer direkten Bewegung zu tun haben, lässt sich damit eine Strecke von vielen Lichtjahren in sehr kurzer Zeit zurücklegen, ohne dass die Enterprise besonders schnell unterwegs war. Der Clou: Das Raumschiff beschleunigt nicht selbst auf Überlichtgeschwindigkeit, sondern der Weg bis zum Ziel verkürzt sich. Wie ein Surfer wird die Enterprise von einer Welle mitgezogen, allerdings von einer Welle im Raum selbst.

1) Durch was oder wen bei Star Trek diese „Einheitszeit“ festgelegt ist, an der sich alle zu orientieren haben, wird in den Serien nicht geklärt.

Die Energiefalle

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie beeinflussen große Massen oder Energien die Zeit. Uhren gehen je nach Raumkrümmung schneller oder langsamer. Dies lässt sich mit Atomuhren in Flugzeugen experimentell sehr genau untersuchen und muss in Navigationssystemen berücksichtigt werden. Erzeugt aber der Warp-Antrieb nicht zwangsläufig Zeitverzerrungen, die man eigentlich mit ihm vermeiden wollte? Die Antwort ist ganz klar: nein! Wie das im Detail aussieht, ließen die Star-Trek-Entwickler zunächst im Dunklen. In den Sechzigerjahren genügte ihnen die beschriebene relativ vage Möglichkeit der Fortbewegung nach den Regeln der Allgemeinen Relativitätstheorie. Hauptsache, die Zeit blieb unverändert.

Erst rund drei Jahrzehnte später nahmen sich Physiker dieses Problems an. Den Anfang machte 1994 der aus Mexiko stammende Theoretiker Miguel Alcubierre, der damals an der Universität von Cardiff in Wales arbeitete. Ihm gelang es, eine

Raumzeit-Konfiguration anzugeben, die nichts anderes als einen „Warp-Antrieb“ darstellt [3]: eine „Raumzeit-Blase“, an deren Vorderseite der Raum kontrahiert und an deren Rückseite das Raumzeit-Gefüge expandiert wird (Abb. 1). Damit ist es möglich, die Entfernung bis zum Zielort mit scheinbarer Überlichtgeschwindigkeit zurückzulegen [3]. Die Zeit verläuft innerhalb der Raumzeit-Blase genauso ab wie außerhalb und ist so keinen Verzerrungseffekten unterworfen. Außerdem ist der Raum innerhalb der Blase quasi in Ruhe, sodass ein Raumschiff im Inneren keinerlei Trägheitskräften unterliegt. Die bei Star Trek oft erwähnten und offenbar vorschnell eingeführten „Trägheitsdämpfer“ können deswegen sofort wieder ausgebaut werden. Für den Warp-Antrieb sind sie jedenfalls nicht nötig, da die Crew gar keine hohen Beschleunigungen aushalten muss.

Ein Raumschiff in einem Alcubierreschen Raumzeit-Gefüge „surft“ quasi auf einer Raumzeit-Welle zum Zielort, genauso wie es von den Star-Trek-Entwicklern ursprünglich vorgesehen war. Alcubierre bewies mit seiner Arbeit, dass ein Warp-Antrieb rein prinzipiell möglich wäre. Die Berechnungen zeigen allerdings auch, dass sich eine Warp-Blase nur mit „exotischer Materie“ erzeugen lässt, die „negative Energie“ hat. Gemeint ist dabei weniger Energie als im Vakuum. Das ist nicht so unphysikalisch wie es zunächst klingt, sondern als Unterdrückung von Vakuumfluktuationen beim Casimir-Effekt auf mikroskopischen Dimensionen bekannt.

Nach der Veröffentlichung von Alcubierres Arbeit über den Warp-Antrieb begann eine rege Untersuchung dieser speziellen Raumzeit-Konfiguration – mit ganz unterschiedlichen Resultaten: William A. Hiscock bewies 1997 beispielsweise, dass die Alcubierre-Lösung

instabil wird, wenn die Gesetze der Quantenphysik ins Spiel kommen [4]. Im gleichen Jahr zeigten Michael J. Pfenning und Lawrence H. Ford, dass eine Warp-Blase mit einem Durchmesser von rund hundert Metern, wie sie von Alcubierre berechnet wurde, viel zu viel Energie benötigt [5]: Für einen einzigen Warp-Flug wäre das Zehnmilliardenfache der im gesamten Universum geschätzten vorhandenen Energie nötig! Obwohl theoretisch auf den ersten Blick möglich, wären die beiden gewichtigen Gründe Anlass genug, um den Warp-Antrieb als physikalisch unmöglich einzustufen.

Doch 1999 gelang es Chris van den Broeck von der Universität Leiden, beide Probleme zu lösen [6]. Dazu schloss er die Alcubierre-Warp-Blase um zwei weitere Blasen herum. Die äußere Blase, also die eigentliche Alcubierre-Warp-Blase, setzte er dabei als sehr klein mit einem Radius von einem Billionstel Millimeter an. Die innerste Blase besitzt dafür jedoch eine Oberfläche, die einer Blase von 200 Metern Durchmesser entspricht. Diese scheinbare Diskrepanz ist in einer vierdimensionalen Geometrie möglich, bei der allerdings unser Vorstellungsvermögen versagt. Van den Broecks Rechnungen zeigten, dass sich dadurch der Energiebedarf um den sagenhaften Faktor 10^{32} auf „nur“ noch das Energieäquivalent einiger Sonnenmassen reduzieren ließe – leider immer noch unrealistisch hoch.

In den Star-Trek-Serien findet die „Warp-Feld-Theorie“ als eigenständiges Forschungsgebiet immer wieder Erwähnung. Alcubierre und van den Broeck haben dem Gebiet mit ihren Arbeiten den Weg in die reale Welt geebnet.

Die fremde Materie

Trotz dieser erstaunlichen Forschungsergebnisse muss man jedoch klar sagen, dass wir gegenwärtig von der Realisierung eines auch nur Warp-ähnlichen Antriebs wesentlich weiter entfernt sind, als es beispielsweise der Neandertaler von der Concorde war! Drei Gründe sind dafür ausschlaggebend:

- Die benötigten Energiemengen dürften prinzipiell nicht mehr viel weiter zu verringern sein, denn die Stärke der Raumkrümmung durch Materie ist nur winzig klein. Daher werden für Warp-ähnliche Antriebe immer Energien zu kontrollieren sein, die der Größenordnung ganzer Sterne entsprechen. Dies erscheint auch in weiter Zukunft unmöglich.
- Die schon erwähnte exotische Materie ist ein neuralgischer Punkt. Es ist inzwischen bewiesen, dass jede Warp-ähnliche Antriebsform, die quasi Überlichtgeschwindigkeit ermöglicht, den Einsatz dieser „exotischen Materie“ mit negativer Energie erfordert. Sollte sich also in einer zukünftigen verbesserten Theorie der Raumzeit herausstellen, dass sich negative Energie nur kurzzeitig in Form von Quantenfluktuationen erzeugen lässt, würde jeder Warp-ähnliche Antrieb gegen fundamentale Naturgesetze verstoßen und wäre damit physikalisch unmöglich.

- Reisen mit quasi Überlichtgeschwindigkeit werfen generell das Problem möglicher Kausalitätsverletzungen auf. Beispielsweise wurde gezeigt, dass ein Raumfahrer innerhalb einer Warp-Blase, der sich mit Überlichtgeschwindigkeit im Verhältnis zum Außenraum bewegt, mit dem vorderen Rand und dem Äußeren der Blase nicht kausal verbunden wäre [7]. Er könnte die Blase daher nicht willentlich steuern.

Trotz all dieser Einwände sind der Warp-Antrieb und seine physikalischen Aspekte höchst bemerkenswert und zeigen, dass bei Star Trek richtig gute Physik gemacht wird! Für Physiker ist das Problem des Warp-Antriebes zumindest prinzipiell gelöst. Die Umsetzung der Erkenntnisse der Grundlagenforschung in funktionierende Maschinen bleibt findigen Ingenieuren überlassen.

Beschleunigen auf Warp-5!

Der Warp-Antrieb versetzt das Raumschiff Enterprise also in die Lage, die gigantischen Entfernungen zwischen den Sternen in unserer Galaxis zurückzulegen. Doch wie schnell ist sie dabei eigentlich? Was bedeutet es beispielsweise genau, wenn die Enterprise mit „Warp-5“ durch die Galaxis zischt? Hier lässt sich natürlich nur spekulieren. Doch wenn man sich die Mühe macht und die entsprechenden Geschwindigkeitsangaben bei Star Trek mit den dort zurückgelegten Entfernungen korreliert, ergibt sich ein überraschend konsistenter Zusammenhang (Abb. 2), auch über die verschiedenen Serien hinweg! Die Punkte in der Grafik geben gewissermaßen die „Messwerte“ für eine Funktion w an, die den Warp-Faktor in eine reale Geschwindigkeit umrechnet. Wir suchen nun eine Funktion, die diese Punkte am besten verbindet. Zunächst einmal gilt, dass die gesuchte Funktion an drei Stellen exakt bekannt ist. Bei $w = 0$ muss sie den Wert Null haben, denn Warp-0 bedeutet logischerweise

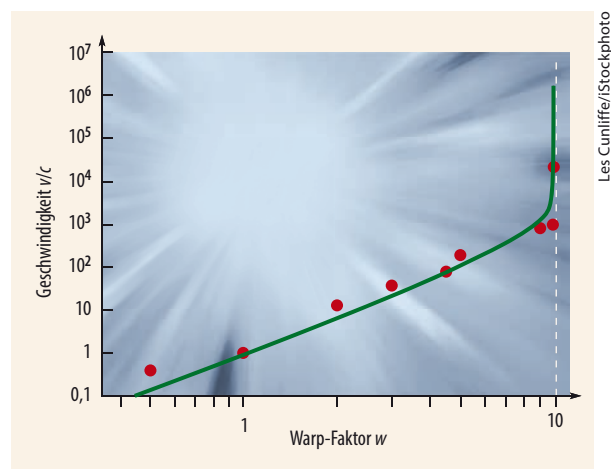


Abb. 2 Die Geschwindigkeit v eines Raumschiffs in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit c lässt sich als Funktion der in den Star-Trek-Serien genannten Warp-Faktoren w auftragen (Punkte). Da Warp-10 unendliche Geschwindigkeit bedeutet, geht die Skala nur bis 10 (gestrichelte Linie). Die durchgezogene Linie ist das Ergebnis der angepassten Warp-Formel.



Abb. 3 Das Raumschiff Enterprise war Namenspatte für das erste Space Shuttle, das 1976 in Anwesenheit des Erfinders von „Star Trek“ Gene Roddenberry (3. v. r.) und der Schauspieler der ersten Fernsehserie präsentiert wurde.

keine Bewegung. Für $w = 1$ sollte exakt die Lichtgeschwindigkeit herauskommen, also $v/c = 1$, und bei $w = 10$ muss sich der Wert unendlich ergeben. Dies wird in den Serien ausdrücklich so gesagt. Weiterhin legen die aufgetragenen Punkte nahe, dass im mittleren Bereich von 0,4 bis 9,9 für w ein Potenzgesetz gilt. Die folgende „Warp-Formel“

$$v/c = 0,3 \times \sqrt{11} \times (1 - w^2/10^2)^{-1/2} \times w^n$$

liefert die geforderten naheliegenden Werte von v/c : Für $w = 0$ ergibt sich 0, für $w = 1$ liefert die Formel 1 und für $w = 10$ ist der Nenner des Vorfaktors Null, sodass der Ausdruck unendlich groß wird. Für Werte von w über 10 ist die Formel sinnlos, weil dann der Ausdruck in der Klammer negativ würde. Insbesondere der Vorfaktor erinnert an den Faktor $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ der Speziellen Relativitätstheorie, der dafür sorgt, dass die Lichtgeschwindigkeit c nicht überschritten werden kann. Bei der Warp-Formel sorgt dieser Nenner entsprechend dafür, dass 10 der maximal mögliche Warp-Faktor w ist. In der Warp-Formel ist aber der Exponent n noch unbestimmt. Wir haben ja nur ein Potenzgesetz gefordert, wissen aber noch nicht welches. Den Exponenten n bestimmt man nun durch eine Anpassung der Formel an die Datenpunkte. Gesucht ist also ein Wert n , für den die Punkte am besten durch die Warp-Formel für v/c beschreiben sind. Die Linie zeigt das Resultat: $n = 2,85$. Die Formel beschreibt die Geschwindigkeiten für die einzelnen Warp-Faktoren wirklich hervorragend (Abb. 2), auch das starke Ansteigen für Warp-Faktoren in der Nähe von 10 wird völlig korrekt wiedergegeben. Wir sehen also, dass bei Star Trek wirklich eine Menge quantitativ zu erklären ist, wenn man sich die Mühe macht, genauer hinzuschauen!

Ganz neue Dimensionen

Der Warp-Antrieb ist nur ein Beispiel von vielen, die zeigen, dass in der Serie viel Physik steckt bzw. sich damit auch Physik erklären lässt. So spricht Captain Janeway in einer Episode aus „Star Trek: Voyager“ von der „Schwelle des H_2 -Moleküls“ und gibt tatsächlich einen nachvollziehbaren Energiewert von 14,7 eV an. Überall in den Folgen der Star-Trek-Serien verstecken sich Anspielungen auf Elementarteilchen, auch solchen die (vermeintlich) noch unentdeckt sind wie Gravitonen oder Tachyonen. Neutrinos gehören bei Star Trek fast schon zum Alltag. Die dafür vorhandenen Detektoren von der Größe eines Smartphones dürften die Wissenschaftler des riesigen Ice Cube-Experiments sicher neidisch machen. Nimmt man alle Zahlen bei Star Trek ernst, lässt sich sogar berechnen, dass das Raumschiff Enterprise nur 158 Kilogramm wiegt [2]! An manchen Stellen stimmen die Zahlen also wohl doch nicht. Oder es gibt die Trägheitsdämpfer doch, denn die 158 Kilogramm sind die träge Masse des Raumschiffs ...

Literatur

- [1] L. M. Krauss, The Physics of Star Trek, Harper Collins (1996), deutsch: Die Physik von Star Trek, Heyne, München (1996)
- [2] M. Tolan, Die Star Trek Physik, Piper, München (2016)
- [3] M. Alcubierre, Classical and Quantum Gravity **11**, L73 (1994), <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0264-9381/11/5/001/meta>
- [4] W. A. Hiscock, Classical and Quantum Gravity **14**, L183 (1997); <https://arxiv.org/abs/gr-qc/9707024>
- [5] M. J. Pfenning und L. H. Ford, Classical and Quantum Gravity **14**, 1743 (1997); <https://arxiv.org/abs/gr-qc/9702026>
- [6] C. van den Broeck, Classical and Quantum Gravity **16**, 3973 (1999); <https://arxiv.org/abs/gr-qc/9905084>
- [7] C. Clark, W. A. Hiscock und S. L. Larson, Classical and Quantum Gravity **16**, 3965 (1999); <https://arxiv.org/abs/gr-qc/9907019>

DER AUTOR

Metin Tolan wurde 1993 an der Universität Kiel promoviert und habilitierte sich dort im Jahr 2001. Im gleichen Jahr nahm er einen Ruf auf einen Lehrstuhl an der TU Dortmund an. Seit 2003 ist er Mitglied der NRW Akademie der Wissenschaften, seit 2008 des Rektorats seiner Universität. Als DPG-Vorstandsmitglied war er mehrere Jahre für den Bereich „Öffentlichkeitsarbeit“ zuständig. Seine Arbeitsgebiete sind die Erforschung des Grenzflächenverhaltens von weicher Materie mit Röntgenstrahlung und die Nutzung von Synchrotronstrahlung zur Materialforschung. Metin Tolan wurde mit zahlreichen Preisen geehrt, u. a. dem Communicator-Preis der DFG. Mit seinen populärwissenschaftlichen Büchern, vielen Vorträgen und Fernsehsendungen trägt er zur Verbreitung von naturwissenschaftlicher Denkweise in der Öffentlichkeit bei.



DPG / Greiner