

Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.

Hermann Minkowski (1907)

Liebe Leserin, lieber Leser,

am 25. November ist es ein Julianisches Jahrhundert her, dass Albert Einstein (1879–1955) der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin die 3 1/2-Seiten Schrift „Die Feldgleichungen der Gravitation“ vorlegte. Die **A l l g e m e i n e** Relativitätstheorie (ART) ersetzt Sir Isaac Newtons (1643–1727) Gesetz der Schwere aus dem Jahre 1687. Einstein revidierte Newton ohne Not – an Newtons $1/r^2$ -Gesetz gab's in puncto Genauigkeit kaum etwas auszusetzen –, allein aus **f o r m a l e n** Erwägungen heraus, die bereits zehn Jahre zuvor, bei seiner Speziellen Relativitätstheorie (SRT) eine Rolle gespielt haben. Das hat Schule gemacht und gibt seither den methodischen Rahmen ab. Damit wollen wir uns befassen. Die ART ist übrigens unübertroffen, obwohl sie nach allgemeiner Überzeugung der wahre Jakob nicht sein kann.

Die Floskel „alles sei relativ“ ist nicht Albert Einstein anzulasten. Im Gegenteil, die Lichtgeschwindigkeit ist in seinem Gedankengebäude absolut. Sie ist immer dieselbe, unabhängig vom Bewegungszustand des Betrachters und eben keine „Ansichtssache“!

Einsteins Weltansicht zu teilen bereitet geistiges Vergnügen. Ein solches wünscht den Lesern dieses und des folgenden¹ Kosmos-Boten

Hans-Erich Fröhlich

¹Kein Vergnügen ohne Anstrengung! Die Schönheit einer physikalischen Theorie zu schauen ist nicht umsonst. November-Thema ist erst einmal die SRT.

Der Himmel im November

Merkur wird am 17. November von der Sonne bedeckt. Anschließend, nach seiner oberen Konjunktion, taucht er östlich der Sonne auf, was aber nichts an seiner Novemberunsichtbarkeit ändert.

Venus ist Morgenstern und schrumpft, dabei rundlicher werdend. Am 3. zieht sie südlich am Mars vorbei. Am 7. gesellt sich die alte Mondsichel zum Morgentrio Venus, Mars und Jupiter.

Saturn steht am 30. November in Konjunktion zur Sonne und ist unsichtbar.

Heuristisches

Natur an sich ist unerforschlich! Nehmen wir die Physik, die elementarste Naturwissenschaft. Sie beschränkt sich darauf zu beschreiben, wie die Natur sich zeigt, rückt man ihr mit realen Messgeräten zu Leibe. Das gilt, liebe Kantianer, auch für Raum und Zeit. Insbesondere gibt es keine starren Stangen geeichter Länge, den Raum auszuloten, und Zeit ist, was eine (Atom)Uhr zeigt. Über Raum und Zeit an sich zu sinnieren, losgelöst vom Messprozess, macht keinen Sinn. Raum und Zeit sind für den Physiker eben nicht wie bei Immanuel Kant (1724–1804) a p r i o r i² gegeben und als reine A n s c h a u u n g s f o r m e n Bedingung für die Möglichkeit von Erfahrung. Orts- und Zeitangaben, ja sogar die zeitliche Reihenfolge von Ereignissen, sie sind nicht absolut. Sie beziehen sich konkret immer auf einen bestimmten Bezugskörper. Einstein bemüht das Bild des Eisenbahnzuges, der geraden Weges ohne zu beschleunigen oder zu bremsen die Landschaft durchweilt. Für den Bahnreisenden ist der Zug das Bezugssystem, für die Person auf dem Bahnsteig der feste Erdboden. Für den einen gleitet die Landschaft vorüber, für den anderen der Zug. Beide Betrachtungsweisen sind gleichberechtigt. (Von der Tatsache, dass die Erde rotiert, sehen wir ab.) Die Wahl des Bezugssystems ist subjektiv, die physikalischen Gesetze aber sollten unabhängig vom speziellen Bezugssystem formulierbar sein. Sie sind objektiv.

²Man sollte gerechterweise erwähnen, dass Kant der erste war, der das Problem gesehen hat. Die Lösung hat erst Darwin (1809–1882) gefunden: Kants geniales Apriori ist ein Aposteriori – die im Laufe der Stammesgeschichte durch Ausmerzen falscher Vorstellungen über Raum und Zeit gewonnene „Erfahrung“. Ein Vogel, in dessen Hirn der Raum falschdimensional repräsentiert wäre, wäre schlicht nicht lebens- und fortpflanzungsfähig!

Gibt es einen Leitfaden, der einem beim Erraten eines physikalischen Gesetzes, das gewisse Erfahrungen in Kurzform zusammenfassen soll, hilft? Einstein, ein Meister der *H e u r i s t i k*, überlegte sich dazu folgendes. Ein Gesetz sollte (a) keine unbeobachtbaren Größen enthalten, und es sollte (b) beim Wechsel des Bezugssystems in ein Gesetz „von genau gleicher Fassung“ übergehen, d. h., seine mathematische Struktur erhalten³.

Spezielle Relativitätstheorie

Die Theorie fußt auf zwei Erfahrungstatsachen:

1. dem Relativitätsprinzip und
2. der Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Beide scheinen einander auszuschließen.

Das Relativitätsprinzip ist ein alter Hut. Geistiger Vater ist kein Geringerer als Galileo Galilei (1564–1642): Befindet man sich unter Deck eines Schiffes, ist es prinzipiell unmöglich, durch Beobachtungen oder Experimente festzustellen, ob das Schiff im Hafen vor Anker liegt oder mit konstanter Geschwindigkeit gleichförmig-geradlinig über die ruhige See dahinsegelt. Diese Feststellung aus dem Jahre 1632 trifft *z u n ä c h s t* einmal auf sog. Inertialsysteme zu. Einstein schreibt deshalb einschränkend vom Relativitätsprinzip „im engeren Sinne“. In einem Inertialsystem sind die Bewegungsgesetze der Mechanik besonders einfach⁴, weil Scheinkräfte, wie Flieh- und Corioliskraft, fehlen.

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist eine Erkenntnis neueren Datums. Die Wellentheorie des Lichtes wirft die Frage nach dem Trägermedium auf. Von Schallwellen weiß man, dass sie eines Trägers bedürfen. (Der luftleere Raum kennt keine Akustik!) Die Rolle des luftigen Elements sollte beim Licht der sog. *Ä t h e r* übernehmen. Die Hoffnung, dadurch doch noch *d a s* Ruhesystem⁵ zu finden, sie erfüllte sich indes nicht. Der Weltenäther, die

³Man spricht von *K o v a r i a n z*, Unveränderlichkeit der Gesetzes*form*.

⁴Das GPS, das wir im Straßenverkehr benutzen, gehört nicht dazu. Es bezieht sich wie die Wetterkarte auf die rotierende Erdoberfläche. Ein Inertialsystem konnte aber keine Tief- oder Hochdruck*wirbel*!

⁵Nur Kosmologen kennen ein ausgezeichnetes Bezugssystem zur Messung von Absolutgeschwindigkeiten: die 3-K-Strahlung.

„Inkarnation“ des leeren Raumes, war einfach nicht fassbar, wie u. a. der negative Ausgang des berühmten Michelson-Experiments von 1881 im Keller des Hauptgebäudes des Astrophysikalischen Observatoriums auf dem Potsdamer Telegraphenberg zeigte. (Das Experiment ist in der Folgezeit anderenorts mit größerer Präzision wiederholt worden.) Obwohl die Erde auf ihrer Jahresbahn um die Sonne mit einem Zehntausendstel der Lichtgeschwindigkeit dahineilt, ist kein „Ätherhauch“ zu spüren, auch nicht saisonal! Damit steht fest: Die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist absolut und ein natürliches Tempolimit! In Anerkennung ihres speziellen Status wurde sie 1983 „par ordre du mufti“ ein für alle Mal festgelegt: $c = 299\,792\,458$ m/s. Man könnte auch sagen, das Ur-Meter sei durch eine „Ur-Geschwindigkeit“ ersetzt worden.

Die naive Newtonsche Vorstellung von einem absoluten Raum und einer absoluten Zeit – also die gängige Vorstellung von Raum und Zeit! – verführt dazu, anzunehmen, Raumkoordinaten transformierten sich beim Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen selbstverständlich gemäß einer sog. Galilei-Transformation⁶. Die Zeit wird nicht transformiert. Es wundert nicht, dass die Gesetze der Newtonschen Mechanik gegenüber der Galilei-Transformation *f o r m i n v a r i a n t* sind. Beispiel Zweites Newtonsche Gesetz: Kraft = Masse \times Beschleunigung. Die Beschleunigung ist die zweite Ableitung der Ortskoordinate nach der Zeit. Sie ändert sich in der Tat nicht, addiert man lediglich eine konstante Geschwindigkeit. Die mathematische Struktur des Kraftgesetzes bleibt erhalten! Es kommt sogar zahlenmäßig das Gleiche heraus.

Aus der Galilei-Transformation folgt das Gesetz von der Addition der Geschwindigkeiten: Jemand, der sich mit 1 m/s auf einem Lastkahn, der pro Sekunde 2 m zurücklegt, von achtern nach vorn bewegt, hat relativ zum Ufer eine Geschwindigkeit von 3 m/s. Auch wenn wir dies intuitiv für richtig halten, Licht hält sich nicht daran!

Wie man vor Einstein herausfand, sind die Gleichungen, die Elektrizität und Magnetismus beschreiben, also auch die der Optik, was ihre Gestalt an-

⁶Wir betrachten zwei Systeme, K und K' . Letzteres bewege sich mit konstanter Geschwindigkeit v in x -Richtung. Zum Zeitpunkt $t = 0$ mögen alle Koordinatenangaben übereinstimmen. Dann gilt: $x' = x - v \cdot t, y' = y, z' = z$ und $t' = t$. Bei Translation in y - und z -Richtung gelten entsprechende Formeln. Die Länge eines Stabes, $l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$, ist von der Galilei-Transformation nicht betroffen ($l = l'$), auch nicht die Länge eines Zeitintervalls ($t_2 - t_1 = t'_2 - t'_1$).

belangt, „immun“ bzgl. einer sog. Lorentz-Transformation⁷, benannt nach Hendrik Lorentz (1853–1928). Einstein gefiel das ganz und gar nicht: hier (Elektrodynamik) die Lorentz-Transformation, dort (Mechanik) die Galilei-Transformation. Er fragte sich, wie sähen die Gesetze der Mechanik aus, wären sie hinsichtlich Koordinatentransformation verträglich mit der Elektrodynamik. Er hielt offenbar mehr von der neueren Elektrodynamik als von der klassischen Mechanik. Zum einen sind optische Experimente hochgenau und zum anderen taucht eine charakteristische Geschwindigkeit auf, c , die Lichtgeschwindigkeit. Er opferte nicht nur das (vektorielle) Addieren von Geschwindigkeiten, er verwarf auch den Gedanken, Gleichzeitigkeit bei räumlich getrennten Ereignissen habe für jedermann die gleiche Bedeutung, und destillierte daraus eine neue Mechanik – die *S p e z i e l l e* Relativitätstheorie (SRT). Sie ersetzt die Newtonsche Mechanik (jedenfalls weitab von Schwerfeldern). Das „Opfern“ fiel dem großen Gelehrten leicht. Wie eine Analyse des Messprozesses lehrt, erforderte allein die messtechnische Umsetzung der Vorstellung einer absoluten Zeit das Synchronisieren von Uhren an unterschiedlichen Orten, was möglich wäre, verbände man die Uhren durch frei bewegliche starre Stangen, die es aber wegen der endlichen Geschwindigkeit der Wirkungsfortpflanzung nicht geben kann. Gleichzeitigkeit ist deshalb bei räumlich getrennten Ereignissen problematisch⁸.

Die jedermann einleuchtende Galilei-Transformation, sie entspringt idealen Vorstellungen von Raum und Zeit, die messtechnisch nicht umsetzbar sind! Kein Wunder, dass der „gesunde Menschenverstand“, nicht gewöhnt an hohe Geschwindigkeiten, auf der Strecke bleibt. Er erliegt dem Kantschen Apriori (Vorurteil).

Raum und Zeit haben ihre Eigenständigkeit eingebüßt. Da beide über die fixierte Lichtgeschwindigkeit miteinander verbandelt sind, macht allein die vierdimensionale Raum-Zeit Sinn. Das erkannt zu haben ist das Verdienst von Einsteins Lehrer an der Züricher ETH, Hermann Minkowski (1864–1909).

⁷Um dies zu sehen, müssen die Gleichungen der Elektrodynamik allerdings geeignet geschrieben werden. Wieder seien die Systeme K und K' betrachtet. Die entsprechenden Formeln waren vor Einstein bekannt und lauten für den Spezialfall, dass die x' -Achse entlang der x -Achse gleitet $x' = (x - v \cdot t) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, $y' = y$, $z' = z$ und $t' = (t - v \cdot x/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Für $c \rightarrow \infty$ geht formal die Lorentz- in die Galilei-Transformation über. Es ist schon seltsam, dass derart komplizierte Ersetzungsregeln den Gleichungen der Elektrodynamik formal nichts anhaben.

⁸Physiker sprechen von „gleichzeitig“ nur bei Stößen. Der Gleichzeitigkeitsbegriff ist hier unproblematisch, da sich das Geschehen am gleichen Ort ereignet.

Der Lebenslauf eines Körpers, seine Ortsveränderung im Lauf der Zeit, wird zur *Weltlinie* in der Raum-Zeit, dem vierdimensionalen Minkowski-Raum. Die Weltlinie ist eine lückenlose Aneinanderreihung von Ereignissen. (Ein Ereignis findet zu einer gewissen Zeit an einem gewissen Ort statt. Die Geburt eines Menschen ist ein solches. Der Geburtsort wird durch geographische Länge, Breite und Höhe über dem Meeresspiegel angegeben. Das Geburtsdatum liefert die vierte Koordinate.)

Betrachten wir zwei *E r e i g n i s s e*, zwei Punkte in Minkowskis Raum-Zeit, die durch einen Geradenabschnitt verbunden sind. Der raum-zeitliche (Pseudo)Abstand zwischen den beiden Ereignissen beträgt $(s_2 - s_1)^2 = c^2 \cdot (t_2 - t_1)^2 - l^2$, wobei der räumliche Anteil l , gemäß dem Satz des Pythagoras, gegeben ist durch $l^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$. Mit x , y und z seien die drei räumlichen Koordinaten bezeichnet, mit t die zeitliche. Mäße man die Zeit in Metern statt in Sekunden, könnte man sich das c für die Umrechnung von Zeit in Strecke sparen⁹.

Der Ereignisabstand $s_2 - s_1$ ist, wie man anhand der Fußnotenformeln uns schwer überprüfen kann, gegenüber einer Lorentz-Transformation invariant! *E r* bleibt erhalten (und nicht die Länge l)! Das trifft insbesondere auch auf die Ausbreitung von Licht zu, wo der Abstand $s_2 - s_1$ definitionsgemäß Null ist. Die Lorentz-Transformation sichert also automatisch, dass trotz Wechsel des Inertialsystems die Lichtgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit bleibt. Sie vertritt das *A b s o l u t e* in der Relativitätstheorie und ist der Fels, auf dem Einsteins Lehre errichtet ist. Was für die Lehre spricht: Bei instantaner (sofortiger) Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ginge die Lorentz- in die Galilei-Transformation über¹⁰.

Stünde anstelle des Minuszeichens vor dem Quadrat des räumlichen Abstands ein Pluszeichen, wäre alles klar: Die Lorentz-Transformation liefe auf eine reine Drehung im vierdimensionalen Raum¹¹ hinaus. Dabei blie-

⁹Was unpraktisch wäre. Ein acht Stunden Arbeitstag dauerte gut 8,6 Milliarden Kilometer!

¹⁰... und Magnetfelder verschwinden! Dass der Magnet am Kühlschrank haftet, ist der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit geschuldet!

¹¹Henri Poincaré (1854–1912) hatte deshalb die Idee, die Zeitkoordinate imaginär zu machen, sprich durch $\sqrt{-1} \cdot c \cdot t$ zu ersetzen. Dadurch wird zum einen der Sondercharakter der Zeit unterstrichen, zum anderen aus dem Pseudoabstand ein wirklicher und aus der Pseudodrehung eine wirkliche Drehung, was aber nur formal ein Gewinn ist, da der Drehwinkel nun imaginär. Der Leser möge sich nicht wundern, stößt er auf unterschiedliche Definitionen für das Abstandsquadrat zweier Ereignissen.

be die Strecke erhalten, bloß deren Projektion auf die Koordinatenachsen änderte sich. (Man kennt das aus eigener Anschauung: Die projizierte Länge eines Bleistifts hängt vom Blickwinkel des Betrachters ab, die tatsächliche Länge nicht. Man muss sich bewegen, um den wahren Bleistift kennen zu lernen!) Das möge bildlich veranschaulichen, dass bei hohen Geschwindigkeiten (großen Drehwinkeln) sich die Aufteilung der „Strecke“ in den räumlichen und zeitlichen Anteil ändert. Räumliche Koordinatenintervalle werden relativistisch verkürzt (Längenkontraktion) und zeitliche Abstände gedehnt (Zeitdilatation). Der Zeit wird Räumliches zugeschlagen.

Die Sonderrolle der Zeit, die sich im Vorzeichenwechsel bei der Berechnung des Ereignisintervalles ausdrückt, hat Folgen. In Minkowskis Raum-Zeit ist beispielsweise die kürzeste Verbindung nicht mehr die Gerade. Der „Kurzschluss“ zwischen Geburt und 50. Geburtstag führt über eine Spiegelung bei der 25 Lichtjahre entfernten Wega. Der Blick in den Spiegel am 50. Geburtstag zeigt den 0. Geburtstag! Der Ereignisabstand beträgt für den Betrachter 50 Lichtjahre, für das Licht, trotz Umweg, Null Lichtjahre: $s_2 - s_1 = 0$. Lichtbilder altern nicht!

Auch das Kraftgesetz wird vierdimensional: Wie beim Zweiten Newtonschen Gesetz, wo Kraft über eine gewisse Zeitspanne eine Impulsänderung¹² bewirkt, ändert Kraft nun den sog. Vierer-Impuls. Die Änderung ist um so größer, je länger (in Eigenzeit¹³) die Einwirkung. Die vierte Komponente des Impulses, die „zeitliche“, ist übrigens die Energie, woraus folgt, die vierte Komponente der Kraft müsse so etwas wie die Leistung sein. Kurz, auch Impuls und Energie verschmelzen zu einer Einheit. Und der Clou: Diese transformiert sich beim Wechsel des Bezugssystems wie der vierdimensionale Ereignisvektor! So etwas lässt das Herz des Physikers höher schlagen, offenbart sich doch hierin, in formalen mathematischen Symmetrien, die Schönheit einer physikalischen Theorie. Kann so etwas falsch sein?

Und wieder gibt es etwas, das unbehelligt vom Standpunkt des Betrachters bleibt: die Ruhemasse m_0 – Pardon! Wir müssen diese ja in Energieeinheiten ausdrücken: $E = m_0 \cdot c^2$.

Wir merken, wurde vorhin die Zeit sinnvollerweise in Metern angegeben, so nun die Masse in kWh. Energie und Masse sind dasselbe! Der horrenden Umrechnungsfaktor c^2 tut nichts zur Sache, er ist menschengemacht. Man hätte

¹²Die zeitliche Ableitung des Impulses ist, da in der Newtonschen Mechanik die Masse nicht von der Geschwindigkeit abhängt, Masse \times Beschleunigung.

¹³Die Eigenzeit ist die Zeit, die eine am Körper getragene Uhr zeigt.

die Masse ja immer schon in kWh statt in kg angeben können¹⁴. Mit der Energie E wächst die messbare Masse m . Ein Projektil, das an uns vorbeischießt, hat mehr Masse und ist schwerer als eines, das ruht. (Für einen auf dem Projektil sitzenden Beobachter änderte sich natürlich nichts. Insbesondere würde er selbst keinerlei Gewichtszunahme konstatieren.) Lichtgeschwindigkeit kann wegen der Massezunahme für einen Körper mit Ruhemasse nie erreicht, geschweige überschritten werden. Die erforderliche Energie wüchse ins Grenzenlose.

Da eine Wirkung sich höchstens mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, gliedert sich Minkowskis Raum-Zeit kausal in drei Bereiche: vom Betrachter beeinflussbare Zukunft und Vergangenheit, die ihn beeinflusst haben kann. Der dem Lichte unerreichbare Rest ($s^2 < 0$), wie z. B. der „momentane“ Andromedanebel, definiert Gegenwart. Schiller (1759–1805) hat Unrecht mit seinem „Pfeilschnell ist das Jetzt entflogen“. Das „Jetzt“ nimmt breite Raum-Zeit¹⁵ ein. Sein Markenzeichen: Selbst die zeitliche Reihenfolge von Ereignissen ist fraglich! Beim „Jetzt“ von Vor-, Nach- oder Gleichzeitigkeit sprechen zu wollen ist sinnlos. Nur gut, dass Kausalität hier nicht gefragt ist.

Fassen wir zusammen. In der Newtonschen Welt blieben räumliche Abstände und zeitliche beim Wechsel der Betrachtungsweise *g e t r e n n t* erhalten. Die Länge eines Zollstockes änderte sich genauso wenig wie die Dauer einer Sekunde. In Einsteins Welt hingegen, wo – um der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit willen – die strenge Scheidung von Räumlichem und Zeitlichem aufgehoben werden muss, ist nur noch eines absolut, der vierdimensionale Pseudoabstand! (Im Falle der Fortpflanzung von Licht im Vakuum ist dieser stets Null, unabhängig vom Inertialsystem.) Für Impuls und Energie gilt entsprechendes.

Alle diesbezüglichen Erfahrungen geben Einstein recht. Da ist im übrigen nichts, was man verstehen müsste! Man muss akzeptieren, dass die wirkliche Welt anders ist, als man vor 1905 gedacht. Sie ist im gewissen Sinne sogar übersichtlicher, einfacher geworden: Die Formeln der Einsteinschen Mechanik sind gegenüber den gleichen Symmetrieoperationen (Lorentz-Transformation) forminvariant wie die der Elektrodynamik. Die Mechanik wurde erfolgreich

¹⁴... was zugegebenermaßen unpraktisch wäre, entspräche ein Pfund doch immerhin 12,5 Milliarden kWh.

¹⁵Die letzte Gelegenheit, wo mich ein Bewohner des Andromedanebels hat ärgern können, liegt 2,5 Millionen Jahre zurück. Und frühestens in 2,5 Millionen Jahren kann ich mich revanchieren, indem ich augenblicklich handele. Das „Jetzt“ zieht sich in 2,5 Millionen Lichtjahren Entfernung 5 Millionen Jahre hin!

der Optik eingegliedert. Statt zweier Erhaltungsgesetze, jeweils einer für Masse und Energie, gibt es nur noch einen einzigen. Die messbare Masse ändert sich. Newtons Mechanik ist deswegen nicht wertlos. Im Grenzfall sofortiger (instantaner) Signalausbreitung ($c \rightarrow \infty$) geht die Transformation des Herrn Lorentz nämlich in die des Herrn Galilei über und die Physik des Herrn Einstein in die Schulphysik. Niemandem fiel ein, bei den im Alltag üblichen Tempi relativistisch zu rechnen. Ein Düsenflugzeug schafft $0,000\,001\,c$, und selbst die schnelle Raumsonde bringt es gerade Mal auf $0,0002\,c$. Die relativistischen Effekte halten sich in Grenzen. Anders sieht es aus bei Beschleunigern, wo Teilchen bis auf fast Lichtgeschwindigkeit gebracht werden. Für deren Konstruktion ist die SRT unverzichtbar.

Was das Beispiel Einstein lehrt? Alles, was man gelernt hat, kann sich als falsch herausstellen, selbst dann, wenn es nützlich bleibt. Und der Glaube an das Walten verborgener Symmetrien ist ein verlässlicher Führer beim Betreten von Neuland.

Das war die Revolution von 1905. Auch wenn der weitere Weg für Einstein quasi vorgezeichnet war, der nächste Meilenstein, die ART von 1915, stand der SRT, was die Weltwirkung anbelangt, in nichts nach.

(wird fortgesetzt)