



Auswertung des Hafele-Keating-Experiments

R. Sydow, Niederfinow (Deutschland)
(2022)

abstrakt: Das von den amerikanischen Wissenschaftlern Hafele und Keating im Jahr 1971 durchgeführte Experiment machte Furore. Sie transportierten Atomuhren in „gewöhnlichen Linienflugzeugen“ ([Eck] S. 144) und wollten damit den Effekt der Zeitdilatation nachweisen. Dazu verglichen sie die Laufzeiten der Atomuhren auf einer ostwärts eingeschlagenen Route unter Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit der Erde mit denen auf einer westwärts gerichteten Route, wo die Rotationsgeschwindigkeit abzuziehen war.

Wenn dieses Experiment von den Kritikern in seiner Aussagekraft angezweifelt wird, so lässt sich das anhand der geflogenen Route und der veröffentlichten Daten nachweisen.

Es wird aber gezeigt, dass dem Versuch grundsätzlich keine Beweiskraft zum Nachweis der speziellen Relativitätstheorie zukommt.



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abkürzungen	2
Einleitung	3
Die Problemstellung	4
Aufbau einer Excel-Tabelle	8
Diskussion	11
Spielerei mit der Tabelle	15
die Routen theoretisch und real	15
Zeitdilatationen theoretisch und real	16
Schlussfolgerungen	17
Anlagen	21
Anl. 1: Relativgeschwindigkeit im Raum	21
Anl. 2: die Weltumrundung ostwärts	25
Anl. 3: die Weltumrundung westwärts	27
Anl. 4: Uhrenvergleich aus unterschiedlichen Koordinatensystemen	28
Anl. 5: Herleitung der Formel Gl. 1 (s. S. 3)	33
Literatur	35

Abkürzungen

AI	Allumfassendes Inertialsystem (ruhend gegen den Kosmos)
ART	allgemeine Relativitätstheorie
ECI	Earth Centered Inertial (siehe [Fie] S. 1)
f. ü.	frei übersetzt
HKE	Hafele-Keating-Experiment
n. Br.	nördliche Breite
RT	Relativitätstheorie
SRT	spezielle Relativitätstheorie
s. S.	siehe Seite
USNO	United States Naval Observatory



Einleitung

Es geht hier um das 1971 durchgeführte Experiment (siehe [Haf2]) der beiden Wissenschaftler J. C. Hafele und R. E. Keating, die mit Atomuhren um die Welt reisten. Einmal umflogen sie die Erde ostwärts und einmal in Westrichtung. Damit wollten sie durch die Relativgeschwindigkeit ihrer Uhren zu der am Boden verbliebenen Uhr eine Zeitdilation nachweisen. Im Ergebnis konnten sie eine Betätigung der SRT feststellen.

So interessant das Experiment von Hafele und Keating¹ auch sein mag, so steht es doch in der Kritik. Diese Kritik bezieht sich einerseits auf die Versuchsdurchführung und andererseits auf die Auswertung der Ergebnisse.

Selbst wenn die Versuchsergebnisse von unabhängiger Seite² geprüft wurden, erscheint die Versuchsdurchführung schier unmöglich zu Ergebnissen führen zu können, die Aussagen im Nanosekundenbereich möglich machen sollten.

Wer nach Gründen dafür suchen sollte, warum das von HKE nicht beweiskräftig, ja unbrauchbar ist, wird in [Mue] fündig. So zum Beispiel waren die Gangunterschiede der mitgeführten Atomuhren größer als die ermittelten Zeitdifferenzen zur Vergleichsuhr (vgl. [Haf1] S. 278). Leider wurden die Rohdaten nicht veröffentlicht ([Mue] S. 72). Die Uhren wurden manuell während des Experiments nachgestellt (ebd. S. 24). Aufgrund der Erdbeschleunigung soll das Experiment in den Bereich der ART und keineswegs in den der SRT fallen (ebd. S. 72 u. S. 133). Auch kann das HKE als Sagnac-Versuch gesehen werden, sodass sich die Zeitdifferenzen anders begründen würden (ebd. S. 358).

Ein wesentlicher Kritikpunkt ist die Darstellung der Ergebnisse des Experiments. Es werden grundsätzlich die zu erwartenden Zeitdilatationen berechnet, um dann die beim Experiment ermittelten Werte dagegen zu stellen (vgl. [Haf2] S. 168; [Sex] S. 43; [Eck] S. 144; [Fre]; [Scu]). Dabei ist die Herangehensweise bei allen Autoren im Wesentlichen dieselbe. Es werden Mittelwerte angenommen, mit deren Hilfe man dann zu Voraussagen kommt. Dann werden die von Hafele und Keating angegebenen Ergebnisse des Versuches herangezogen und mit den Vorhersagen verglichen. Und obwohl die Annahmen in gewissen Grenzen variieren, stimmen diese in erstaunlicher Weise immer sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein.

In dieser Arbeit geht es aber nicht darum, das HKE zu werten. Die Idee und das Betreiben des Aufwandes, um das HKE durchzuführen, ist eine wissenschaftliche Leistung und ihr gebührt Respekt. Es soll auch nicht die korrekte Durchführung des Experiments untersucht werden und Genauigkeiten der verwendeten Uhren soll nicht in Zweifel gezogen werden. Auch werden die oben angeführten Gegenargumente nicht diskutiert.

¹ die von Hafele und Keating veröffentlichten Artikel sind zu finden unter [Haf1], [Haf2] und [Haf3]

² vgl. hierzu [Spe]

Quellenangabe: Sydow, R. Auswertung des Hafele-Keating-Experiments Niederfinow (Deutschland) 06.06.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#rt-auswertung-des-hafele-keating-experiments>

Revision: 1.3.1.8 vom 18.07.2023
copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow

Hier soll lediglich das sich aus der Versuchsauswertung ergebende Problem analysiert werden. Mittels einer Excel-Tabelle wird die Möglichkeit geschaffen, das Experiment komfortabel nachzuvollziehen, um daraus eigene Schlüsse ziehen zu können. Mit dieser Tabelle können dann die Annahmen so variiert werden, dass deren Änderungen Rückschlüsse auf ihren Einfluss auf die Auswertung zulassen.

Dass dann natürlich Schlüsse aus den gewonnenen Erkenntnissen gezogen werden, führt zu ganz neuen Einsichten in die Problematik des HKE.

Die Problemstellung

Worin ist das Problem dieses Experiments eigentlich zu sehen?

Ist es die Rotation der Flugzeuge um den Erdmittelpunkt? Wenn es die Kreisbewegung sein sollte, welche die Flugzeuge aufgrund der Krümmung der Erdoberfläche vollführen, die nun mal nicht anders möglich ist, lässt sich der Versuch auch gestreckt darstellen (vgl. Bild 1)

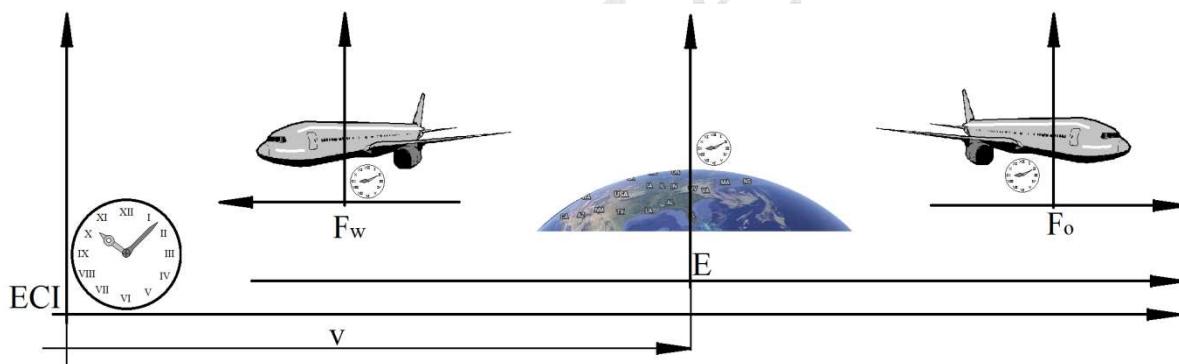


Bild 1: gestreckte Darstellung des HKE

Nun sollte klar werden, was Schlegel ([Scl] S. 237) meinte. Er sagte: „Die Gleichung (1) [(siehe Gleichung Gl. 1)] ist korrekt für die Feststellung des Verhältnisses der im Flugzeug transportierten und der ruhenden Uhr, wenn es von einer hypothetischen Bezugsreferenz [ECI-Frame] betrachtet wird. Aber es kann bestimmt nicht als Verhältnis der im Flugzeug transportierten Uhr zu der auf der Erde ruhenden Uhr interpretiert werden, das ein Beobachter auf der Erde wahrnimmt“ (f. ü. ebd.).

Es geht dabei um die von Hafele und Keating verwendete Formel (vgl. [Haf1] S. 268) zur Berechnung der Zeitdilatation:

$$\frac{d\tau}{d\tau_0} = f/F = 1 + gh/c^2 - (2R\Omega v + v^2)/2c^2 \quad ([\text{Scl}] \text{ S. 237}; \text{vgl. } [\text{Haf1}] \text{ S. 268}) \quad \text{Gl. 1}$$

In dieser Formel setzt sich das Verhältnis der Zeitintervalle $d\tau/d\tau_0$ aus drei Bestandteilen zusammen.



Einerseits ist es die eins, die ausdrückt, dass ohne relativistische Einflüsse $d\tau = d\tau_0$ sein muss. Für eine Höhe $h = 0$ und ein Geschwindigkeit $v = 0$ erfüllt sich diese Bedingung.

Der zweite Term der rechten Seite von Gleichung Gl. 1 weist auf den gravitativen Einfluss hin. In Abhängigkeit der Höhe wird die Uhr im Flugzeug schneller gehen.

Letztlich bleibt der geschwindigkeitsabhängige Term der Gleichung aus welchem die Zeitedilatation nach der SRT abzuleiten ist. Dieser birgt 2 Geschwindigkeitsanteile in sich. Mit $R\Omega$ wird eine Geschwindigkeit aus der Erdrotation beschrieben und v ist die Geschwindigkeit des Flugzeugs gegen den Boden. Die Entwicklung dieser Zusammenhänge wird in [Haf3] S. 166 ausführlich beschrieben und in Anl. 5 ist die Herleitung des letzten Terms gezeigt.

Es wird von Schlegel ([ScI] S. 237) eindeutig gesagt: „Der geschwindigkeitsabhängige relativistische Effekt des Laufs einer Uhr ist beziehungsorientiert und beruht direkt auf der Relativgeschwindigkeit zwischen den Koordinatensystemen zweier Uhren. Er kann nicht als das Verhältnis der Effekte zu einem dritten System gefunden werden. Wenn sich die Uhr A mit der Geschwindigkeit v_1 zu einer Uhr C bewegt und die Uhr B bewegt sich mit der Geschwindigkeit $v_2 \neq v_1$ relativ zu C, dann muss das Verhältnis der Uhren A und B aus der Relativgeschwindigkeit zwischen A und B gefunden werden und nicht aus den Verhältnissen dt_A/dt_B oder dt_B/dt_A in einem Koordinatensystem C“ (f. ü. [ScI] S. 237).

Hafele widerspricht der Kritik Schlegels. Er stellt fest: „Der geschwindigkeitsabhängige relativistische Effekt ist nicht immer ‚rein beziehungsorientiert‘ für begrenzte (nicht unendlich kleine) Zeitintervalle“ (f. ü. [Haf4] S. 238).

Das ist zwar wenig glaubwürdig, denn die SRT Einsteins lässt Ausnahmen nicht zu. Und wenn Hafele darauf hinweist, dass mit der Umrundung der Erde etwa der Sagnac-Effekt ins Spiel kommen kann, dann steht die Beweisführung von den Versuchsergebnissen zur SRT auf wackligen Füßen.

Nun hat aber Einstein selbst die Grundlage zur Idee des HKE gelegt. Er behauptet: „Man sieht sofort, daß [sic] dies Resultat [die Zeitedilatation] auch dann noch gilt, wenn die Uhr in einer beliebigen polygonalen Linie sich von A nach B bewegt, [sic] und zwar auch dann, wenn die Punkte A und B zusammenfallen“ ([Ein] S. 904).

Allerdings sagte Einstein damit nicht, dass die Uhren, die unterschiedliche Wege absolvierten, dann auch unterschiedliche Zeitedilatationen aufweisen müssen. Er wollte lediglich darauf hinweisen, dass in den Gleichungen der Zeitedilatation (ebd. S. 904) der Weg keine Rolle spielt. Wenn das auch noch nicht zu unterschreiben ist, sollte aber klar sein, dass die Zeit richtungsunabhängig ist.

Insofern ist wohl ein Fehler im HKE, dass gerade diese von Einstein geforderte Bedingung nicht eingehalten ist. Betracht man das ECI-System, ist zu sehen, dass die Startpunkte im USNO als Referenz für den Beginn der von den Uhren durchlaufenen Wege anzunehmen ist.

Aber derselbe Punkt ist nach Beendigung des jeweiligen Fluges an einer anderen Stelle in diesem Koordinatensystem.

Wäre der Endpunkt des jeweiligen Fluges an derselben Stelle und das ist er auch im Koordinatensystem der USNO, dann hätte das Ergebnis nach den Aussagen der SRT für den Ost- und den Westflug gleich ausfallen müssen.

Aber Hafele und Keating haben ja die Zeiten gerade im System des ECI betrachtet. Also mussten sie zu der Differenz in der Zeitdilatation kommen. Daraus erhebt sich die Frage, wo ist nun das Problem?

Das Problem liegt darin, dass Hafele und Keating recht haben könnten. Das HKE erbrachte ja die Zeitdifferenzen, sodass der praktische Beweis gegeben scheint. Wenn das aber so wäre, dann stellen sich viele Fragen:

- Beweist das HKE die dann noch SRT, obwohl in der SRT ausschließlich die Relativgeschwindigkeit als Ursache für die Zeitdilatation heranzuziehen ist?
- Welches Koordinatensystem ist für solche Betrachtungen zu wählen, wenn man die Zeitdilatation von Uhren auf gekrümmten Bahnen bestimmen möchte? Dass es ein beliebiges System sein kann, ist wohl nicht anzunehmen.
- Ist es nicht ein absolutes System, von dem auszugehen ist, wenn Hafele und Keating recht hätten?

So ist es! Hafele unterstellt ein absolutes Inertialsystem, auf das sich alle Geschwindigkeiten zu beziehen haben. Er schreibt in [Haf3] S. 167 unter Note 6: „Wenngleich alle Inertialsysteme hoch spezialisiert sind, haben sie ein objektives, physikalisches Verhältnis mit dem Universum, weil sie keine Beschleunigung und keine Rotation zum Universum haben“ (f. ü. ebd.).

Wie kommt er auf diese Idee in den 70er Jahren, wo die SRT bereits weite Anerkennung gefunden hat?

Der Grund für diesen Rückschritt ist in Hafeles weiteren Ausführungen zu finden: „Der Zeitunterschied, der von zwei am selben Ort befindlichen Uhren angezeigt wird, ist eine physikalisch beobachtbare Größe, die unveränderlich ist. Deshalb ist eine korrekte Ableitung der relativistischen Zeitdifferenz nach einer Rundreise unabhängig von einem einzelnen Inertial-Referenzsystem. Das heißt, dass eine folgende Koordinatentransformation in das nicht-inertiale Ruhesystem der Uhren nicht notwendig ist“ (f. ü. ebd.).

Er bezieht sich mit diesen Formulierungen auf Builder (siehe [Bui1]), der eine „eingeschränkte Relativitätstheorie“ (siehe ebd. S. 279 1. Satz) entwickelte. Dabei ist die Einschränkung in seiner Theorie, dass sich im Raum ein ruhendes Inertialsystem vorgestellt werden kann, das entsprechend den Ausführungen Machs (siehe [Mac] Kap. II Unterpunkt 6



S. 216 ff.) gegen den Fixsternhimmel nicht beschleunigt ist und gegen diesen auch nicht rotiert.

Interessant ist in dieser Theorie, dass die Kenntnis dieses AI gar nicht nötig ist, um auf die Zeitdilatationen zwischen anderen Systemen zu schließen. Nach Builder ist das Ergebnis einer Messung unabhängig davon, ob die Betrachtung der Uhren auf das AI bezogen wird oder ob man irgendein anderes Inertialsystem findet, das ebenso wie das AI gegen den Fixsternhimmel nicht beschleunigt wird und gegen diesen auch nicht rotiert. Builder sagt: „In der Tat halten die Gleichungen auch dann, wenn das System S nur hypothetisch ist und die Werte in den Gleichungen bloß angenommen werden oder wenn sie aus Messungen von einem anderen System kalkuliert wurden“ (f. ü. [Bui1] S. 281).

Ob das wirklich so ist, bleibt ohne Beweis! Ganz im Gegenteil ist diese Aussage eher zu bezweifeln (siehe Anl. 4).

Die Quintessenz Builders ist: „Es ist daher eingeschlossen, dass wir keine haltbare Alternative zur Ätherhypothese haben [...]“ (f. ü. [Bui1] S.294).

Und damit sollten wir ein Problem haben. Wenn das HKE korrekt sein sollte, dann sind wir wieder beim absoluten Raum und der Äthertheorie.

Natürlich könnte man sagen, dass Versuche wie das HKE nicht im massefreien Raum durchgeführt werden können. Natürlich ist das Experiment ein Versuch, der die Bedingungen der ART mit zu berücksichtigen hat.

Und sicher ist es offensichtlich, dass man die Zeiten von Uhren, die nebeneinander liegen, von jedem Punkt des Raumes und mit jeder relativen Geschwindigkeit ablesen kann, so es denn technisch zu realisieren geht.

Und es gibt noch einen Gedanken, der nicht einfach von der Hand zu weisen ist. Das Relativitätsprinzip ist in HKE ausgehebelt. Unabhängig von der Geschwindigkeit der Erde gegen ein hypothetisches AI oder einer Geschwindigkeit im Kosmos ergibt sich eine Zeitdilatation in diesem Experiment immer in derselben Weise. Dabei ist es „[...] unwesentlich, ob die M's [ein im Flugzeug mitfliegender Beobachter] Ablesungen von seiner Uhr durch R's [der am Boden verbliebene Beobachter] Ablesungen von dessen Uhr bestimmt sind oder umgekehrt“ ([Bui2] S. 249; vgl. [Bui2] S. 251). Um es anders auszudrücken, das Ergebnis solcher Versuche ist immer dasselbe, unabhängig davon, von welchem System aus es betrachtet wird. Dieses Ergebnis ist absolut.

Wenn aber diese Herangehensweise dazu führt, dass die Äthertheorie wieder eingeführt werden kann, dann erscheint es widersinnig, den Versuch des HKE als Beweis für die SRT heranzuziehen.

Und das ist ein Problem!



Aufbau einer Excel-Tabelle

Der in der folgenden Excel-Tabelle darzustellende Rechengang ergibt sich aus den Berechnungen von Hafele und Keating. Da sie selbst diesen Rechengang nicht veröffentlichten, wird sich auf die Beispielrechnung von Freund ([Fre]) bezogen.

Die Farben, in denen die Excel-Felder unterlegt sind bedeuten:

	Eingaben sind möglich, sollten aber unterbleiben, weil die vorgegebenen Werte begründet sind
	Hier können die Werte variiert werden, um die Reaktion im Ergebnis zu interpretieren
	in diesen Feldern sind Formeln hinterlegt. Eingaben in diese Felder zerstören die Formeln
	hier sind die Werte der Veröffentlichung [Haf1] oder abgeleitete Werte abgelegt. Diese können so übernommen werden oder dienen zum Vergleich mit den Ergebnissen

Als Eingangsparameter werden die folgenden Werte eingegeben:

- B3 die Lichtgeschwindigkeit „c“
B4 die Erdbeschleunigung „g“
B5 der durchschnittliche Erdradius bei Annahme, dass die Erde eine Kugel sei
B6 der mittlere Breitengrad, den das Flugzeug um die Erde genommen hat
B7 Dadurch, dass das Flugzeug nicht geradlinig auf dem Breitengrad lang flog, ist hier ein Faktor für die Verlängerung durch Umwege einzutragen (siehe Anlage 2 und 3). Dabei bedeutet 100%, dass der Flug direkt auf dem Breitengrad absolviert wird. Kleinere Werte als 100% sind sinnlos da eine Abweichung vom Breitengrad eine Verlängerung des Weges bedeutet.
B9 der vom Flugzeug absolvierte Weg bei der Erdumrundung von Dulles nach Dulles. Dieser wird berechnet nach der Formel:
„=2*PI()*B5*COS(B6/180*PI())*B7/100000“
und hängt direkt von der Ungeradheit des Kurses ab.
B11 hier ist die Flugrichtung zu wählen. Wie in der Tabelle vorgegeben bedeutet 1 ostwärts und -1 westwärts. andere Zahl dort einzutragen, führt zu Fehlrechnungen.
B12 Die Flugdauer kann frei eingegeben werden. Die Vorgabewerte ergeben sich aus Anl. 2 und 3. Aus der Veränderung der Flugdauer resultiert dann eine entsprechende Geschwindigkeit, die sich ihrerseits auf die Zeitdilatation auswirkt.
B13 die Durchschnittsgeschwindigkeit wird berechnet. Dazu ist einfach der Flugweg durch die Flugzeit zu dividieren. Die Gleichung in dieser Zelle lautet: =B11*B9/B12
B16 die mittlere Reisehöhe ist hier einzutragen. Dabei ist wie vor beschrieben auf die Art der Integration von Starts und Landungen zu achten.
B17 Zur Berechnung der Zeitdilatation aus dem Potentialgefälle ist dieses zu berechnen. Hier wird die einfache Formel gh angewendet. In der Zelle B18 steht dann: =B4*B16
B18 Die Berechnung des Faktors für die relative Zeitdilatation aus dem Gravitationsgefälle wird nach der Formel:



$$\Delta\tau_{\text{rel}} = \frac{\Phi}{c^2}$$

Gl. 2

berechnet. Das führt zu der Gleichung in B18=B17/B3/B3

- B19 Die Zeitspanne, auf die sich dieser Faktor bezieht ist die Flugzeit. Diese Berechnet sich aus dem Weg des Fuges durch die Fluggeschwindigkeit.
Es steht dort die Gleichung: =ABS(B9/B16). Das Bilden des Absolutwertes ist erforderlich, weil die Zeitdauer unabhängig von der Flugrichtung ist.
Formal steht dieser Wert auch im Feld B12.
- B20 hier wird die gesamte während des Fluges in der Flughöhe verursachte Zeitdilatation aus dem Potentialgefälle berechnet. Sie ergibt sich aus dem Produkt der Flugzeit mal der relativen Zeitdilatation. Diese ist dann mit den Faktoren 10^9 und 3600 zu multiplizieren, um den Wert in ns zu erhalten. Die zugehörige Formel lautet:
=B19*B18*1000000000*3600
- B23 hier ist die Rotationsgeschwindigkeit der Erde gegen das ECI zu berechnen. Dabei ist ein Punkt auf dem in B6 angegebenen Breitengrad als Referenz heranzuziehen. Die Geschwindigkeit dieses Punktes ermittelt sich dann aus dem Umfang des Breitengrades durch die 24 Stunden pro Drehung. Das ist dann die Geschwindigkeit des USNO gegenüber dem ECI.
Der Umfang des Breitengrades berechnet sich aus dem Radius von der Rotationsachse zum Breitengrad und ist $U_{Br} = R \cdot \cos(\text{n. Br.})$ und die zugehörige Formel in Excel ist:
=2*PI()*B5*COS(B6/180*PI())/24000.
Darin wird mittels 2π der Kreisumfang berechnet und mittels Division durch 1000 die Umrechnung in km/h erreicht.
- B24 Hat man die Geschwindigkeit des USNO, kann dessen relative Zeitdilation gegen das ECI berechnet werden. Dazu wird die übliche Formel (siehe Gl. A4.1) verwendet. Wollte man die von Hafele verwendeten Formeln (siehe [Haf3] S. 166) nehmen, erhielte man im Rahmen der Genauigkeit dieselben Ergebnisse. Die Zelle enthält die Formel: =1-WURZEL(1-B23*B23/3,6/3,6/B3/B3)
- B25 Nun lässt sich die Gesamtgeschwindigkeit des Flugzeugs gegen das ECI ermitteln. Es ist lediglich die Summe der Geschwindigkeit des Flugzeugs aus B16 und der eben berechneten Geschwindigkeit aus der Erddrehung zu nehmen.
=B23+B13
- B26 Aus der Relativgeschwindigkeit aus B25 gegen das ECI leitet sich ein Zeitdilatationsfaktor ab. Dieser berechnet sich nach der Formel:
$$\delta\tau_{\text{rel}} = 1 - \sqrt{1 - v_G^2/c^2}$$
 Gl. 3
Dabei wird die Formel von 1 abgezogen, um den Wert der relativen Zeitdilatation zu verdeutlichen: =1-WURZEL(1-B25*B25/3,6/3,6/B3/B3)
- B27 Hier wird nun die Differenz der Zeitdilatationen zwischen der USNO und dem Flugzeug ermittelt. Da die Zeit, die für die Dilatation aus der Geschwindigkeit identisch ist mit der aus der Gravitation-Zeitdilatation, steht hier lediglich: das Produkt aus der relativen Zeitdilatation mal der Zeit mal den Umrechnungsfaktoren:
=(B24-B26)*B19*1000000000*3600
- B33 Die Summierung der Zeitdilatation aus dem Potentialgefälle und der aus der Geschwindigkeit sollte dann der Zeitdilatation entsprechen, die während der Durchführung des HKE gemessen wurden.
=B20+B27



Der folgenden Tabelle Tab. 1 ist ein Rechenbeispiel für den Ostwärtsflug des Flugzeugs mit in der Literatur gefundenen Daten zu entnehmen.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Nachvollziehen des Hafele-Keating-Experiments						
2	Flugdaten			ostwärts	westwärts	Literatur	Bem.
3	c	299792458,00	[m/s]				
4	g	9,81	[m/s ²]				
5	Erdradius	6371000,00	[m]				
6	Breitengrad	34,00	[°n.Br.]	34	31	[Haf1] S. 273	
7	Ungeradheit	109,00	[%]	127,31	122,8	Anl. 2 u. 3	
8							
9	Flug	36173,30	[km]	42252,3	42120,1	Anl. 2 u. 3	
10							
11	Flugrichtung	1,00		1	-1	def.	
12	Flugdauer	41,23	[h]	41,23	48,65	Anl. 2 u. 3	
13	Geschw.	877,35	[km/h]	874,8	784,8	berechnet	
14			[m/s]	243	218	[Haf1] S. 273	
15	Gravitation						
16	Höhe	8900,00	[m]	8900	9360	[Haf1] S. 273	
17	φ	87309,00	[m ² /s ²]				
18	dτ rel	9,71E-13	[]				
19	Zeit	41,23	[h]				
20	dτ abs	144,19	[ns]	144	179	[Haf3] S. 166	theor.
21							
22	Geschwindigkeit						
23	Rotation	1382,77	[km/h]				
24	dτ rel Erde	8,21E-13	[]				
25	Gesamt v	2260,13	[km/h]				
26	dτ rel Flug	2,19E-12	[]				
27	dτ abs	-203,63	[ns]	-184	96	[Haf3] S. 166	theor.
28							
29	Summierung						
30	Gesamt	-59,44	[ns]	.40 ± 23	275 ± 21	[Haf1] S. 273	theor.
31			[ns]	-.59 ± 10	273 ± 7	[Haf2] S. 168	real

Tab. 1: Nachvollziehen des HKE

Der Sinn dieser Tabelle besteht darin, die nach dem Rechenschema von Hafele und Keating zu erwartenden Zeitdilatationen zu ermitteln. So sind gegebenenfalls Rückschlüsse möglich, von den gemessenen Ergebnissen des Versuchs auf die Ausgangswerte zu schließen. Selbst wenn die Formeln nur eine Näherung der Berechnung zulassen, vermittelt diese Tabelle einen Eindruck über die Realität der im HKE vermittelten Ergebnisse.



Diskussion

Die entwickelte Tabelle (Tab. 1) stellt eine eklatante Vereinfachung der Sachverhalte dar, die bei der Durchführung des Experimentes von Hafele und Keating realisiert wurden. Einige dieser Vereinfachungen seien hier aufgezeigt.

So fanden die Flüge nicht über dem Äquator statt. Es wurde auch nicht ein bestimmter Breitengrad abgeflogen. Da es sich um normale Linienmaschinen handelte, wurden eine Reihe von Flughäfen³ angeflogen.



Bild 2: Route des Fluges in Ostrichtung um die Welt (Karte aus google Maps)⁴

Im Bild 2 sind die Daten der Tabelle II ([Haf1] S. 273) visualisiert. Der Flug begann vom Flughafen Washington-Dulles-International. Bis dahin mussten die Atomuhren vom USNO per Autotransport gebracht werden. Die weiteren Stationen des Fluges sind durch rote Kreise gekennzeichnet. Die Vermittlung der geflogenen Breiten wurde ebd. S. 273 mit 34° n. Br. angegeben. Es wurde in Anl. 2 ermittelt, wie lang der real geflogene Kurs des Flugzeugs war. Daraus lässt sich dann der Faktor $f = 127,31\%$ ermitteln, der aussagt, dass der real geflogene Kurs um die 27,31 % länger war, als es bei einem Kurs direkt über dem 34-ten Breitengrad wäre.



Bild 3: Route des Fluges in Westrichtung um die Welt (Karte aus google Maps)⁵

Für das Bild 3 gelten dieselben Bemerkungen wie vor. Die Flugrichtung ist nun lediglich von rechts nach links. Der gemittelte Breitengrad ist hier mit 31° n. Br. angegeben. Der ermittelte Faktor ergab sich in Anl. 3 zu $f = 122,8\%$.

³ die angeflogenen Flughäfen sind in [Haf1] S. 273 zu finden

⁴ Der Bereich des geflogenen Korridors in östlicher Richtung erstreckt sich von $13,68^{\circ}$ n. Br. bis $51,47^{\circ}$ n. Br. Der Mittelwert wurde in [Haf1] S. 273 mit 34° n. Br. angegeben.

⁵ bei der westlichen Route erstreckt sich der geflogene Korridor über eine Breite von $13,68^{\circ}$ n. Br. bis hin zu $52,69^{\circ}$ n. Br. Hier wurde der Mittelwert ebd. S. 273 mit 31° n. Br. bestimmt.

Quellenangabe: Sydow, R. Auswertung des Hafele-Keating-Experiments Niederfinow (Deutschland) 06.06.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#rt-auswertung-des-hafele-keating-experiments>

Revision: 1.3.1.8 vom 18.07.2023
copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Zum Schluss wurden die Uhren wieder per Autotransport zum USNO gebracht.

Aus solchen Routen leiten sich die verschiedensten Einflüsse auf die zu erwartenden relativistischen Effekte ab. So ergibt sich aus der Position des Flugzeugs an verschiedenen Breitengraden ein anderer gravitativer Einfluss bei gleicher Höhe des Flugzeugs über der Erdoberfläche. Da die Erde eine abgeplattete Form hat, befindet sich ein Flugzeug in nördlicheren Regionen dichter am Erdmittelpunkt, was zu höherer Gravitation in einer Höhe im Verhältnis zur selben Höhe an einer Position in Äquatornähe führt.

Solche Einflüsse wurden nicht weiter in Betracht gezogen. Es wurde von einer Kugelform der Erde ausgegangen.

Auch bedeutet der ‚schräge‘, vom Breitengrad abweichende Kurs des Flugzeugs eine höhere Geschwindigkeit als dessen Projektion auf dem Kurs entlang eines Breitengrades. Das Flugzeug legt einen längeren Weg zurücklegen, als wenn es direkt auf dem durchschnittlichen Breitengrad entlang flöge. Wird dieser längere Weg auf die absolvierte Zeit bezogen, folgt daraus eine größere Geschwindigkeit. Diese höhere Geschwindigkeit sollte ihrerseits zur Verstärkung eventueller relativistischer Effekte führen.

Es ergibt sich die Frage, in welcher Weise bei diesem HKE die Geschwindigkeiten in die Berechnung der Zeitdilatation einzurechnen sind. In Anl. 1 wird herausgestellt, dass nach den Regeln der SRT die Relativgeschwindigkeit des Flugzeugs zum USNO unabhängig von der Flugrichtung die Zeitdilatation bestimmt.

Da aber bei dem Verfahren der Ermittlung von Zeitdilatationen gegen ein hypothetisches ECI gerechnet wird und dem Flugzeug sowohl eine Geschwindigkeit aus der Erddrehung als auch aus der Bewegung über die Erdoberfläche beigemessen wird, steht die Frage nach der Art der Überlagerung dieser Geschwindigkeiten. Nach normalem Ermessen sollte es sich um eine vektorielle Addition der beiden Geschwindigkeiten zu einer Resultierenden handeln, die hier anzuwenden wäre.

Aus den Bildern Bild 2 und Bild 3 geht augenscheinlich hervor, dass es im Kurs der Flugzeuge weite Strecken gibt, wo zwischen den beiden genannten Geschwindigkeiten eine Spreizung von etwa 45° vorliegt. Damit wäre ein wesentlicher Einfluss bei der Bildung der Resultierenden anzunehmen.

Interessant ist aber bei der Rechnerei der Relativgeschwindigkeit mit oder gegen die Erdrotation, wie dort diese orthogonale Komponente zu bewerten ist. Wenn in die Berechnung einer Relativgeschwindigkeit die Erdrotation mit einbezogen wird, ist die Geschwindigkeit eines Punktes der Erdoberfläche natürlich vom Breitengrad abhängig. Eine Änderung der Position bezüglich des Breitengrades führt dann offensichtlich auch zur Änderung der anzusetzenden Geschwindigkeit aus der Erdrotation.

Letztlich wäre bei exakter Betrachtung einzukalkulieren, dass die Verkehrsflugzeuge auf Großkreisen fliegen und damit der aktuelle Breitengrad nicht einfach über lineare Interpolation zu ermitteln ist.

Als nächstes sind die Flugzeiten zu bewerten. Wenn die Gesamtflugzeiten in [Haf1] S. 273 für den ostwärts Flug mit 65,42 und für den westwärts Flug mit 80,33 Stunden angegeben wurde, dann ist das keineswegs die Zeit, auf die sich die relativistischen Effekte beziehen. Es gab hinreichend viele Pausen am Erdboden, wo jedenfalls die Relativgeschwindigkeit und das Gravitationsgefälle gegenüber dem USNO gegen null gehen.

Zieht man diese Pausen (Anl. 2 und Anl. 3) von der Gesamtzeit ab, liegen die Flugzeiten für den ostwärts Flug nur noch bei 41,23 und den westwärts Flug bei 48,65 Stunden⁶.

Das, was dabei keine Beachtung findet, ist der Einfluss der vielen Starts und Landungen. Diese Flugmanöver bedeuten für den Einfluss auf die Zeitdilatation einen Übergang von keiner Dilatation zu maximaler Dilatation beim Start und umgekehrt bei der Landung. Das gilt dann sowohl für den Einfluss aus Gravitation als auch den aus der Geschwindigkeit. Dabei werden sich diese Effekte beim Start und der Landung nicht gegeneinander aufheben, sondern sie werden sich kumulieren.

Betrachtet man ein Landemanöver (siehe Bild 4), wird klar, dass die Landung bei einer Flughöhe von 9 km etwa 170 km vor dem Flughafen einzuleiten ist und dann noch etwa 25 Minuten bis zur Landung vergehen.

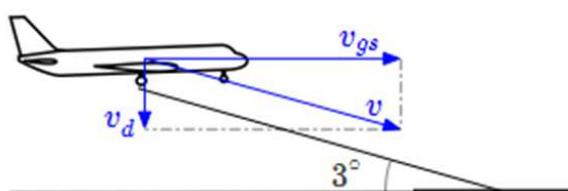


Bild 4: Sinkflug eines Verkehrsflugzeugs ([Bis])

Analog wäre die Kalkulation beim Start zu durchzuführen. Sicherlich ist das Steigmanöver etwas differenzierter und damit komplizierter zu kalkulieren.

Damit ist veranschaulicht, dass die oben angegebenen Flugstunden nicht vollständig in die Rechnung der Excel-Tabelle (Tab. 1) eingehen dürfen.

Die Start- und Landemanöver werden sich aber nicht auf die durchschnittliche Geschwindigkeit des Flugzeugs auswirken. Diese „Rampen“ im Geschwindigkeitsverlauf verändern die Durchschnittsgeschwindigkeit deshalb nicht, weil sich der durchflogene Weg nicht verändert und auch die Flugzeit inclusive der Rampen bereits vermittelt wurden.

⁶ die Flugzeiten können aus Tabelle II ([Haf1] S. 273) durch Differenzbildung zwischen Start und Landung des Flugzeugs und deren Addierung ermittelt werden.

Quellenangabe: Sydow, R. Auswertung des Hafele-Keating-Experiments Niederfinow (Deutschland) 06.06.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#rt-auswertung-des-hafele-keating-experiments>

Revision: 1.3.1.8 vom 18.07.2023
copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow

Diese Vermittlung der Flugzeit bedeutet aber, dass auch bei der rechnerisch vorher ermittelten Zeitdilatation eine Vermittlung erfolgt. Da aber die Zeitdilatation keine lineare Funktion ist, wäre nachzuweisen, welchen Einfluss die Vermittlung auf das Ergebnis haben wird.

Wenn dann in der Excel-Tabelle (Tab. 1) Werte eingetragen sind, können die dort angezeigten Ergebnisse mit denen von Hafele und Keating verglichen werden. Für die ostwärts geflogene Route sollten -40 ns und für die westwärts geflogene sogar 275 ns als Zeitdilatation herauskommen (siehe [Haf1] S. 273).

Keine Beachtung soll der Einfluss der Pausen in unterschiedlichen Höhen finden. Obwohl aus Bild 5 ersichtlich ist, dass während des Ostfluges mehrere Flughäfen in höheren Lagen angeflogen wurden, bleibt dieser Umstand in der Excel-Tabelle ohne Auswertung. Der sich aus diesem Fakt der unterschiedlichen Höhen im Zusammenwirken mit den dort verbliebenen Pausenzeiten ergebenden Effekt sollte in einer gesonderten Untersuchung quantifiziert werden.

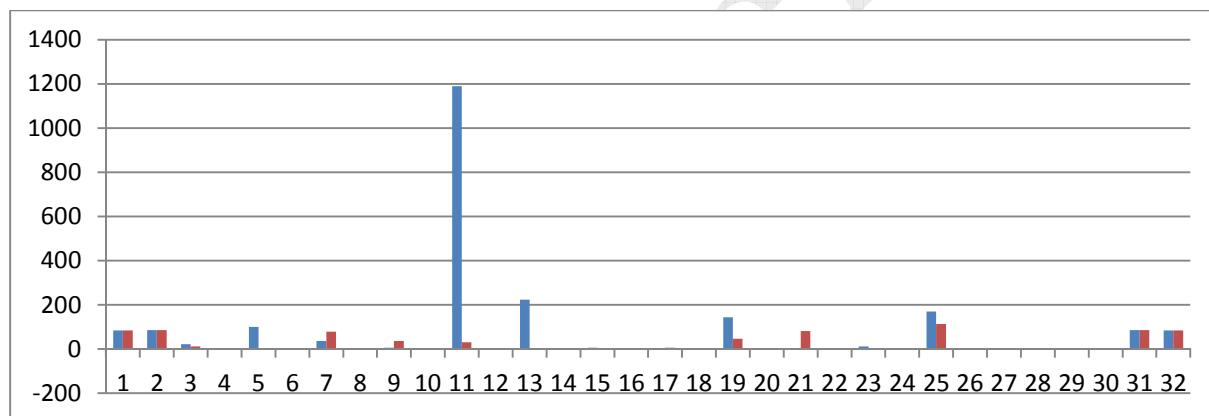


Bild 5: Höhenlagen der angeflogenen Flughäfen (blau = ostwärts; braun = westwärts)

Dass die Flugzeuge grundsätzlich Großkreise fliegen, ist in der Excel-Tabelle durch die Anwendung der Großkreisermittlung (siehe Anl. 2 Beschreibung der Berechnung des Weges) vorgenommen. Die Darstellung der Flugstrecken als Linien (siehe Bild 1 und Bild 2) dient nur der Veranschaulichung und stimmt nicht zwingend mit den geflogenen Kursen überein.

In der Ausführung der Versuchsdurchführenden wurde explizit darauf hingewiesen (siehe [Haf1] S. 272), dass sich die Geschwindigkeitsdaten aus der Geschwindigkeit gegen den Boden ergaben. Geht man nun davon aus, dass bei gleicher Winkelgeschwindigkeit der Erde die Geschwindigkeit der Flugzeuge in ihrer Höhe größer sein muss, als die Geschwindigkeit gegen den Boden gemessen, ist hier eine Fehlerquelle. Da nach der Kalkulation die Differenz nur im Bereich von 1 km/h liegen sollte, wird auch hier auf die Auswertung verzichtet.



Spielerei mit der Tabelle

Nun kann die Kalkulation der Zeitdilatation mittels der Tabelle Tab. 1 durchgeführt werden. Das erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden die Kalkulationen der Routen untersucht. Erst im zweiten Schritt werden die Zeitdilatationen untersucht.

die Routen theoretisch und real

Was an dieser Stelle untersucht werden soll, ist die Frage, ob die Abweichungen der von den Flugzeugen geflogenen Routen vom mittleren Breitengrad mit den von Hafele angegebenen mittleren Geschwindigkeiten korrespondieren. Zur dieser Untersuchung nur die Zeilen 6 bis 13 der Tabelle Tab 1 benötigt. Dort sind die Daten für den Ostflug eingetragen. Der 34-te Breitengrad, die Flugrichtung und die Flugdauer sind den in der Literatur zu findenden Daten entnommen. Für die Starts und Landungen ist null eingetragen, sodass diese in die Berechnung nicht eingehen.

Es ist zu sehen, dass bei einer Ungeradheit von 109% die Geschwindigkeit mit 877 km/h der von Hafele angegeben, mittleren Geschwindigkeit des Flugzeugs mit 874 km/h als übereinstimmend angenommen werden kann.

Dieselbe Übereinstimmung wird erzielt, wenn man die entsprechenden Werte für die Westwärtsfahrt einsetzt und die Ungeradheit mit 111% angenommen wird. Auch hier stimmt die errechnete Geschwindigkeit von 783 km/h mit der von Hafele vorgegebenen Geschwindigkeit von 785 km/h gut überein.

Welche Schlüsse sind daraus abzuleiten?

Als erster Punkt bleibt zu bemerken, dass die Ungeradheit der Touren bestenfalls geschätzt sind. Keinesfalls sind sie rechnerisch ermittelt worden. Während bei den im HKE angegebenen Flugzeiten die Geschwindigkeit der Flugzeuge nur dann erreicht werden können, wenn man von etwa (37000 ± 1000) km Flugstrecke ausgeht, liegt die geflogene Flugstrecke aber nachweislich (vgl. Anl. 2 und 3) bei etwa (42200 ± 50) km. Hier ist eine zu erklärende Diskrepanz in der Annahme der geflogenen Flugstrecken.

Nimmt man die Ungeradheit für den Ostflug von 127,32% an, ergibt sich die real geflogene Flugstrecke mit 42253 km. Daraus leitet sich dann eine erforderliche, mittlere Geschwindigkeit von 1025 km/h ab, um in der angegebenen Zeit die Strecke abzufliegen.

Für den Westflug wäre eine Geschwindigkeit von 866 km/h erforderlich, um die real geflogene Strecke in der angegebenen Zeit durchfliegen zu können.

Aus den von Hafele angegebenen Flugzeiten, die sicherlich sehr genau ermittelt wurden, ergibt sich, dass sie die geflogenen Flugstrecken nicht hätten durchfliegen können. Diese Diskrepanz fordert Aufklärung. Ohne die Offenlegung der Urdaten ist ein Nachvollziehen der Auswertung des HKE nicht möglich.

Zeitdilatationen theoretisch und real

Zur Analyse der Zeitdilatationen sind die Zeilen 16 bis 30 hinzuzuziehen. Bei Annahme der Daten des HKE für den Ostflug ergibt sich das folgende Bild:

Die Zeitdilatation aus dem Potentialgefälle ergibt sich zu 144 ns. Das stimmt exakt mit der vorberechneten Dilatation überein. Insofern sollte hier nichts an den Angaben zu deuteln sein. Die Zeitdilatation aus der Geschwindigkeit ergibt sich zu -204 ns. Das weicht etwas von der vorausberechneten Dilatation von -184 ns ab.

Berechnet man nun aber die Summe der Dilatationen aus dem Gravitationsgefälle und der Geschwindigkeit, so ergibt sich mit -59 ns exakt der Wert, der auch im HKE real gemessen wurde.

Diese Übereinstimmung ist auch ein Hinweis, dass die in Tabelle Tab 1 verwendeten Formeln richtig sein dürften.

Setzt man nun die vorgegebenen Werte für den Westwärtsflug ein und nimmt die Ungeradheit von 111%, sodass sich die vorgegebene, mittlere Geschwindigkeit einstellt, ergibt sich ein völlig anderes Bild.

Zwar stimmt die Zeitdilatation aus dem Potentialgefälle wieder exakt mit den Vorgaben überein. Aber die Zeitdilatation aus der Geschwindigkeit führt zu einer nicht zu vernachlässigenden Abweichung. Hier erhält man eine Dilatation von 122 ns im Gegensatz zu den vorausgesagten 96 ns. Daraus leitet sich eine Differenz von 26 ns ab, die sich im Ergebnis des Experimentes nicht widerspiegelt.

Nun kann man sich die Ergebnisse für den Ostwärtsflug ansehen, wenn über die Eingabe der Ungeradheit mit 127,32 % die Flugroute den Gegebenheiten des HKE angepasst wird.

Die Zeitdilatation aus dem Potentialgefälle wird sich nicht ändern und stimmt wie vorher auch mit den Voraussagen überein. Allerdings müsste sich aus der erforderlichen Geschwindigkeit von 1025 km/h eine Zeitdilatation nach den Formeln von Hafele und Keating von -247 ns ergeben. Daraus folgte dann die Gesamtdilatation zu -103 ns, was einer Abweichung von 75 % des Versuchsergebnisses entspricht.

Auch beim Westwärtsflug stellt sich eine Differenz zum Ergebnis des Versuches ein. Bei der Angleichung der Flugstrecke mittels einer Ungeradheit von 122,75 % folgt für die Zeitdilatation aus Geschwindigkeit ein Wert von 130 ns. Damit ergibt sich für die Gesamtdilatation nur eine Abweichung von 13 %.

Interessant ist nun das Ergebnis der Kalkulation, wenn man ein Flugzeug auf dem 39-ten Breitengrad in westlicher Richtung die Erde in 12 Stunden umrunden ließe und das direkt über der Erdoberfläche täte. Dann eliminierte man die Dilatation aus dem Potentialgefälle und es stellte sich keine Dilatation aus der Geschwindigkeit von 2592 km/h relativ zur Basis im USNO ein. Interessanter Weise spielt der Breitengrad bei diesem Effekt keine Rolle, wenn man nur die Umrundung in 12 Stunden schaffte.



Schlussfolgerungen

„Bevor das HKE durchgeführt⁷ wurde, erklärte Schlegel, dass die asymmetrische Zeitdilatation [...] im Widerspruch zur SRT steht und dass die Zeitdilation ausschließlich von der Relativgeschwindigkeit zweier betrachteter Uhren abhängt. In seiner Erwiderung verteidigte Hafele die Nutzung eines ECI-Systems in seinen Kalkulationen. Die Ergebnisse des HKE zeigten eindeutig, dass Hafele recht hatte und Schlegel unrecht“ (f. ü. aus [Fie] S. 2). So kann man es auch sehen! Diese Aussage ist kurz und knapp. Sie lässt keinen Raum für Zweifel. Das von Field gezogene Resümee lässt aber einen tieferen Hintergrund vermuten. Der Zweck ist offensichtlich. Es geht um die Bestätigung der eingeschränkten Relativitätstheorie, so wie sie von Builder als „The Restricted Theory of Relativity“ deklariert wurde (siehe [Bui1]). Ein AI wird definiert und Zeitdilatationen, die aus einer Geschwindigkeit resultieren, sind gegen dieses Inertialsystem zu rechnen. Wie das funktioniert und wie das zu begründen ist, wird in [Bur] weitestgehend nachvollziehbar dargelegt.

Selbst wenn Builder zwangsläufig zu der Erkenntnis kommt, dass es „[...] die Anerkenntnis fordert, dass da ein einzigartiges, absolutes System existieren muss [...]“ (f. ü. [Bui1] S 287), scheut er sich nicht vom Relativitätsprinzip zu sprechen. Und er geht noch weiter mit seiner Einsicht: „Demnach muss Machs Hypothese verworfen werden und es gibt keine haltbare Alternative zur Ätherhypothese [...]“ (f. ü. [Bui1] S. 291).

Dieser Standpunkt stellt aber den Rückschritt in die voreinsteinische Zeit dar. Einsteins Leistung bestand doch gerade darin, die Relativität des Raumes zu beweisen. Die Abschaffung des Äthers war ein Meilenstein in der Interpretation der SRT. Es ging Einstein gerade darum, dass man mit der RT den eigenen Ort und seine Bewegung im Raum nicht mehr bestimmen kann.

Sollte der Ansatz in Builders Konzept richtig sein, wäre es möglich, die eigene Bewegung in diesem AI zu registrieren. Es wäre ein einfaches Experiment zu starten. Von einem Punkt im Raum, der als der Ruhepol zu bezeichnen sei, befindet sich eine Referenzuhr. Von dieser Uhr werden nun in die verschiedensten Richtungen weitere Uhren geschickt, die der Einfachheit der Auswertung halber alle dieselbe relative Geschwindigkeit zur Referenzuhr haben sollen.

Kontrolliert man nun nach einer festgelegten Zeit die Zeitdilatationen aller Uhren, sollte sich ein schönes, räumliches Bild von der Bewegung der Referenzuhr ergeben.

Zwei Bemerkungen sind hier noch erforderlich. Einerseits steht nicht die Frage der Synchronisation der Uhren zur Debatte. Das Problem ist ein technisches und wurde im HKE hinreichend erörtert ([Haf1]).

⁷ Es gab eine Veröffentlichung [Haf5] vom Juli 1970, in der Hafele die theoretischen Grundlagen seines im Oktober 1971 (siehe [Haf2]) durchgeführten HKE bereits veröffentlichte. Schlegel kritisierte diese Ausführungen im Oktober 1970.

Quellenangabe: Sydow, R. Auswertung des Hafele-Keating-Experiments Niederfinow (Deutschland) 06.06.2022

<https://rolfswelt.de/physik/#rt-auswertung-des-hafele-keating-experiments>

Revision: 1.3.1.8 vom 18.07.2023
copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow

Andererseits steht die Frage nach dem Ablesen der Uhren. Da die Uhren ja in diesem Gedankenexperiment nicht zum Ausgangspunkt zurückkehren, ist ein Verfahren, wie es im Maryland-Experiment (siehe [All] S. 18) angewandt wurde, einsetzbar.

Übrigens, sollte das AI der Realität entsprechen, dann wäre im Maryland-Experiment mit einer gegen null gehenden Zeitdilatation aus der Geschwindigkeit zu rechnen. Letztlich bewegte sich das Flugzeug in Durchschnitt des Fluges nicht vom Fleck. „Die Durchschnittsgeschwindigkeit v ist dann 0“ (f. ü. [Bur] S. 94). Damit wäre die Auswertung des Maryland-Experimentes eine andere.

Es stände eine Entscheidung an, welches Experiment (HKE oder Maryland-Experiment) richtig interpretiert wäre.

Im folgenden Bild (Bild 6) ist die zu erwartende Zeitdilatation des HKE für die verschiedenen Relativgeschwindigkeiten der Flugzeuge (auf der Abszisse dargestellt) berechnet. Dabei wurde von einer Rotationsgeschwindigkeit der Erde am 31-ten Breitengrad von etwa 1400 m/h ausgegangen.

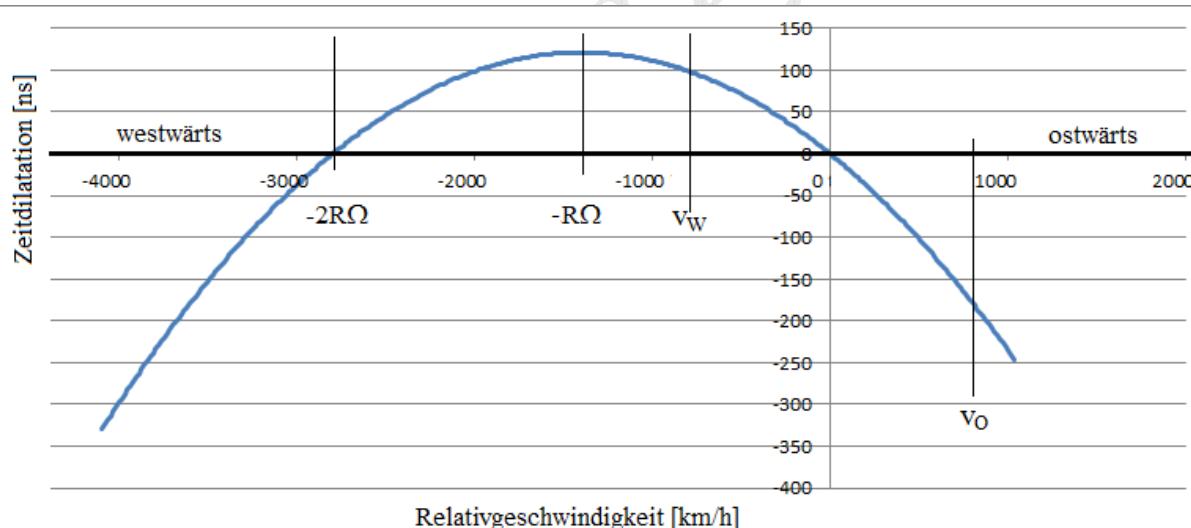


Bild 6: geschwindigkeitsabhängige Zeitdilatation im ECI-System

In das Bild 6 wurden die Geschwindigkeiten der Flugzeuge $v_o = -v_w = 800$ km/h markiert und es wird die Asymmetrie der Zeitdilatationen verdeutlicht.

Es zeigt sich, dass das Maximum der Zeitdilatation in westwärtiger Richtung gerade dann erreicht ist, wenn das Flugzeug die Rotationsgeschwindigkeit erreicht (vgl. Anl 4). Dann wäre es relativ zum ECI in Ruhe und die maximale Zeitdilatation resultierte aus der Relativgeschwindigkeit der auf der Erdoberfläche ruhenden Uhr. Ein Erfassen des ECI wäre also mit ausreichend Messungen möglich, wenn man dieses Maximum der Zeitdilatation gefunden hat.

Quellenangabe: Sydow, R. Auswertung des Hafele-Keating-Experiments Niederfinow (Deutschland) 06.06.2022

<https://rolfswelt.de/physik/#rt-auswertung-des-hafele-keating-experiments>

Revision: 1.3.1.8 vom 18.07.2023

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Das Ermitteln eines solchen Maximums ist zum derzeitigen Stand leider nur reine Theorie. Die Praxis zeigt aber ein anderes Bild. Dieses Bild sieht leider so aus, dass allein das Nachvollziehen der in [Haf1] S. 273 angegebenen Routen zu einer Widerlegung des gesamten HKE führt.

Betrachtet man die Osttour, wird von den Experimentatoren eine durchschnittlich durchflogene Strecke von 36068 km angenommen. Diese Strecke ergibt sich allein daraus, dass nur so die Flugzeit von 41,23 h mit der mittleren Fluggeschwindigkeit von 874,8 km/h korrespondiert. In Anl. 2 ist aber durch Nachvollziehen der einzelnen Streckenabschnitte der Flugroute eine durchflogene Strecke von 42252,3 km bestätigt worden.

Setzt man diese Strecke an, um die erforderliche, mittlere Fluggeschwindigkeit des Ostfluges zu ermitteln, folgt diese mit einem Wert von 1025 km/h. Dieser Wert weicht definitiv von der o. g. Geschwindigkeit ab. Wie aber ist dieser Wert zu erklären? Die Flugdauer ist eindeutig mit verschiedenen Uhren gemessen worden. Hier sollte kein Fehler zu suchen sein. Könnten es die Start- und Landemanöver gewesen sein, die zu einer solchen Abweichung geführt haben? Aber da hier die Geschwindigkeit gemittelt wurde, resultiert das Mittel in einfachster Weise aus dem Quotienten aus Weg durch Zeit. Ist es überhaupt möglich, eine Geschwindigkeit von über 1000 km/h zu fliegen? Ja, möglich ist das mit Hilfe des Jetstreams (vgl. [Heg]). Dafür braucht man lediglich die entsprechende Höhe und Glück. Interessanter Weise wurde die mittlere Höhe des Ostfluges mit ‚nur‘ 8900 m angegeben. Wie sich dort ein Jetstream-Flug erklären kann, bleibt offen.

Betrachtet man die Westtour, nahmen die Experimentatoren eine durchschnittlich durchflogene Strecke von 38087 km an. Nur diese Strecke korrespondiert mit der Flugzeit von 48,65 h und der mittleren Fluggeschwindigkeit von 784,8 km/h. In Anl. 3 ergab sich ebenso durch Nachvollziehen der einzelnen Streckenabschnitte der Flugroute eine durchflogene Strecke von 42120,1 km.

Setzt man diese Strecke an, um die mittlere Fluggeschwindigkeit zu ermitteln, folgt diese mit einem Wert von 866 km/h. Die Abweichung zum angegeben Wert der Experimentatoren ist nicht ganz so groß. Aber dennoch ist die Differenz nicht vernachlässigbar.

Dass die mittlere Höhe der Flugroute hier um 460 m höher ist als beim Ostflug, erzeugt ebenso Zweifel. Waren es nicht beim Westflug 2 Starts und Landungen mehr? Jedenfalls ergaben sich über diese häufigeren Zwischenstopps kürzere Flugabschnitte, die üblicherweise in geringerer Höhe durchflogen werden.

Da die Originaldaten nicht veröffentlicht wurden, sodass ein detailliertes Nachvollziehen der Rechengänge der Durchführenden der Auswertung unmöglich ist und die Auswertung ausschließlich als Rechnung von Mittelwerten präsentiert wird, liegt der Verdacht nahe, dass die Daten hinsichtlich der betrachteten Einflussfaktoren gemittelt wurden, um dann mittels der Mittelwerte das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Die Mittelung der Einflüsse auf die



Zeitdilatation setzt voraus, dass die Zusammenhänge zwischen diesen Einflüssen und der Dilatation linear sein muss. Dass das nicht der Fall ist, zeigt die Gleichung Gl. 1 (s. S. 3) in einfacher Weise. Dort tritt die Relativgeschwindigkeit quadratisch auf.

Ein Nachweis, dass die sich aus der Mittelung ergebenden Abweichung im Rahmen der nötigen Genauigkeiten liegen, steht aus.

Wenn man den Verdacht einer Manipulation ausschließen wollte, müsste man sagen, dass hier ein offensichtlicher, grober Fehler unterlaufen ist. Zumindest liegt hier ein starker Erklärungsbedarf vor.

Würde man die Werte der Anl. 2 und Anl. 3 verwenden, um die Zeitdilatation auszurechnen, die sich nach der Rechenmethode von Builder ergeben müssten, erhielte man:

- für den Ostflug bei einer angenommenem Höhe von 8,9 km und einer Flugzeit von 41,23 h
 - o Soll nach Hafele: -40 ns (Flugstrecke 36068 km)
 - o Soll nach Berechnung Tab. 1 -59 ns (Flugstrecke 36068 km)
 - o Ist nach Hafele: -59 ns (Flugstrecke 36068 km)
 - o neu kalkuliert: -103 ns (Flugstrecke 42252,3 km)
- für den Westflug bei einer angenommenem Höhe von 9,36 km und einer Flugzeit von 48,65 h
 - o Soll nach Hafele: 275 ns (Flugstrecke 38087 km)
 - o Soll nach Berechnung Tab. 1 301 ns (Flugstrecke 38087 km)
 - o Ist nach Hafele: 273 ns (Flugstrecke 38087 km)
 - o neu kalkuliert: 309 ns (Flugstrecke 42120,1 km)

Diese neu kalkulierten Werte sehen nicht wirklich als grundsätzlich falsch abzulehnend aus. Sie weichen offensichtlich von den Werten des Experiments ab, zeigen aber dieselben Tendenzen. Dabei wäre zu beachten, dass die Kalkulation der Sollwerte nach der Berechnung entsprechend Tab 1 sich von den Sollwerten seitens Hafele abweicht.

Großer Nachteil der neu kalkulierten Werte ist die Unmöglichkeit, sie in die Kurve (Bild 6) zu integrieren. Eine geänderte Rotationsgeschwindigkeit der Erdkugel könnte dabei Abhilfe schaffen. Dann wäre aber die Basis für das ECI als AI hinfällig.

Sollte dennoch behauptet werden, dass die Theorie Builders von der eingeschränkten RT ihre Richtigkeit hat, beweist diese Theorie aber nicht die SRT. Allein zu sagen, dass man Zeitdilatationen nachgewiesen hat, führt nicht zu dem Schluss, dass die SRT damit bewiesen ist.



Anlagen

Anl. 1: Relativgeschwindigkeit im Raum

Wenn man sich mit solchen Experimenten beschäftigt, wie sie von Hafele und Keating durchgeführt wurden, dann stellt sich die Frage nach Korrektheit der Interpretation dieser Experimente.

Das durchgeführte Experiment bezieht sich auf einen Uhrentransport mittels Flugzeug und des Vergleichs der von dieser Uhr angezeigten Zeit mit der Zeit einer am Boden verbliebenen Uhr.

Das HKE war das erste derartige Experiment und wurde mit vollen Erdumrundungen in Ost- und Westrichtung durchgeführt.

Es gab weitere Experimente, die zwar keine vollen Umrundungen der Erde aufwiesen, die aber ansonsten dem HKE gleichgelagert waren.

Die Interpretation der durchgeführten Tests mit den fliegenden Uhren wird von Hafele und Keating vorbereitet, indem sie ein Erdmittelpunktssystem als ruhendes System deklarieren (vgl. [Haf3] S. 166 3. Spalte). Auf den Gedanken kamen sie mit der Formulierung: „Die spezielle Relativitätstheorie sagt voraus, dass eine bewegte Standarduhr verglichen mit Koordinatenuhren (real oder hypothetisch), die in einem trägen Referenzraum ruhend verteilt sind, weniger Zeit erfassen wird“ (f. ü. aus [Haf3] S. 166).

Diese sehr freie Interpretation der Voraussetzungen der SRT führt dazu, dass ein Koordinatensystem, dessen Ursprung der Erdmittelpunkt ist, als das ruhende System definiert wird. Relativ zu einem solchen System bewegt sich eine auf der Erdoberfläche ruhende Uhr durch die Drehung der Erde und jede gegen die Erdoberfläche bewegte Uhr ist ebenfalls als zu diesem ruhenden System bewegt anzusehen. Damit ergeben sich sowohl für die Uhr auf der Erdoberfläche als auch für gegen die Erdoberfläche bewegte Uhren Zeitdilatationen aus dieser Geschwindigkeit.

Für die Experimentatoren steht fest, dass die Differenz von derart ermittelten Zeitdilatationen der im ruhenden System bewegten Uhren zu der Zeitdilatation zwischen diesen Uhren führt.

Dem aufmerksamen und vorgebildeten Leser fällt hier bereits auf, dass mit der Einführung dieses Koordinatensystems (ECI-frame⁸), dessen Ursprung im Erdmittelpunkt liegt, ein absoluter Raum deklariert wird, auf den die Bewegungen der beteiligten Uhren bezogen werden.

Wenn selbst der auf der Erdoberfläche ruhenden Uhr eine Geschwindigkeit zugeschrieben wird, bedeutet das, dass das Koordinatensystem nicht rotieren soll. Es soll absolut ruhen. Die Gleichberechtigung zwischen Koordinatensystemen ist damit nicht mehr gegeben. Die Frage, warum beispielsweise nicht ein System mit Ursprung im Mittelpunkt der Sonne gewählt

⁸ die Bezeichnung findet sich in [Fie] S. 1, wo dieser Umstand der Festlegung eines derartigen Koordinatensystems ebenso beschrieben ist
Quellenangabe: Sydow, R. Auswertung des Hafele-Keating-Experiments Niederfinow (Deutschland) 06.06.2022

Revision: 1.3.1.8 vom 18.07.2023
copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



wurde, bleibt unbeantwortet. Formal sollten dann wegen der Erdgeschwindigkeit von etwa 30 km/s mit noch deutlicheren Effekten⁹ aus der SRT zu rechnen sein.

Mit diesem absoluten Raum wird automatisch das Relativitätsprinzip ausgehebelt. Die ostwärts transportierte Uhr wird in dem beschriebenen Koordinatensystem absolut schneller sein, als es die westwärts transportierte ist. Damit kann die Entscheidung nach der Bewegungsrichtung absolut getroffen werden und der Lauf jeder Uhr im Raum ist fest.

Es steht die Frage, wie Einstein das Problem mit den Inertialsystemen verstanden wissen wollte.

Er definierte: Es sei ein ruhender starrer Stab gegeben [...]. Wir denken uns nun die Stabachse in die X-Achse des ruhenden Koordinatensystems gelegt und dem Stabe hierauf eine gleichförmige Paralleltranslationsbewegung (Geschwindigkeit v) längs der X-Achse im Sinne wachsender x erteilt“ ([Ein] S.895).

Dieses gedankliche Bild für die Ausrichtung von Inertialsystemen wird grundsätzlich zur Erklärung für diese herangezogen. Dabei weist die Bezeichnung ‚ruhend‘ nicht darauf hin, dass es ein solches ruhendes System gibt, sondern es ist damit lediglich gesagt, dass der Stab oder der Beobachter usw. diesem System zuzuordnen sind, weil deren Geschwindigkeit bezogen auf das System null ist, sie also in diesem System ruhen. Würde ein zu diesem System bewegter Beobachter ein eigenes Inertialsystem definieren, so ruhte er in seinem System.

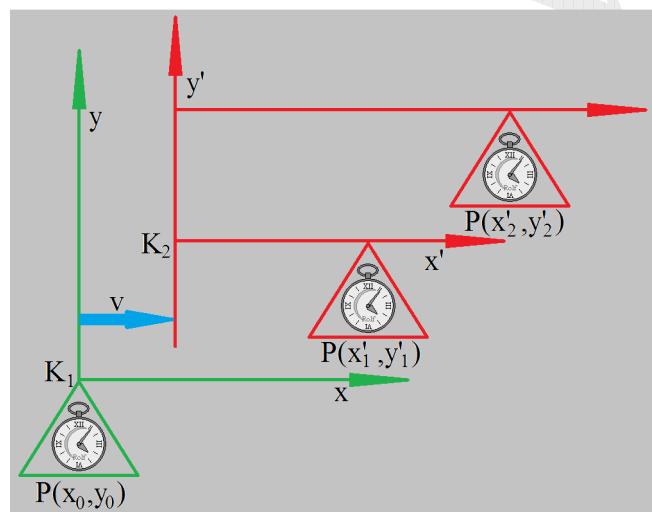


Bild A1.1: verschiedenen Uhren in unterschiedlichen Koordinatensystemen

Wenn es bei [Haf3] heißt, dass es in einem Inertialsystem verteilte Uhren gibt, dann ist damit ausgesagt, dass alle Uhren¹⁰, die in einem System ruhen, denselben Lauf haben. Das ist soweit richtig und gilt auch nach den Vorstellungen Einsteins.

⁹ es würden sich sicherlich andere Probleme bei einer Erdumrundung ergeben, die entsprechend zu interpretieren wären.

Quellenangabe: Sydow, R. Auswertung des Hafele-Keating-Experiments Niederfinow (Deutschland) 06.06.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#rt-auswertung-des-hafele-keating-experiments>

Revision: 1.3.1.8 vom 18.07.2023
copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow

Betrachtet man zwei Koordinatensysteme (siehe Bild A1.1), in welchen Uhren verteilt sind, ergibt sich der Sachverhalt wie folgt:

Unabhängig davon, wie sich die Koordinatensysteme relativ zu anderen Systemen bewegen, ist ihre Relativgeschwindigkeit v (blauer Pfeil). Ein eventuell drittes Koordinatensystem zum Vergleich heranzuziehen zu dürfen, ist nirgends in der SRT erklärt.

Wenn die Uhr am Punkt $P(x_0, y_0)$, die mit dem grünen Koordinatensystem verbunden ist, einen Zeitlauf aufweist, dann ist aus der SRT bekannt, dass der Zeitlauf der Uhren, die mit dem roten Koordinatensystem verbunden sind, ein anderer sein kann. Die einzige diesen unterschiedlichen Lauf bestimmende Einflussgröße ist die Relativgeschwindigkeit v .

Die Verbundenheit mehrerer Uhren in einem Koordinatensystem (z. B. rotes System) führt zu keinem unterschiedlichen Lauf dieser Uhren.

Diese Erkenntnis führt nun für das HKE zu dem Schluss, dass einzig die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Flugzeug und der am USNO stationierten Uhr von Belang sein kann.

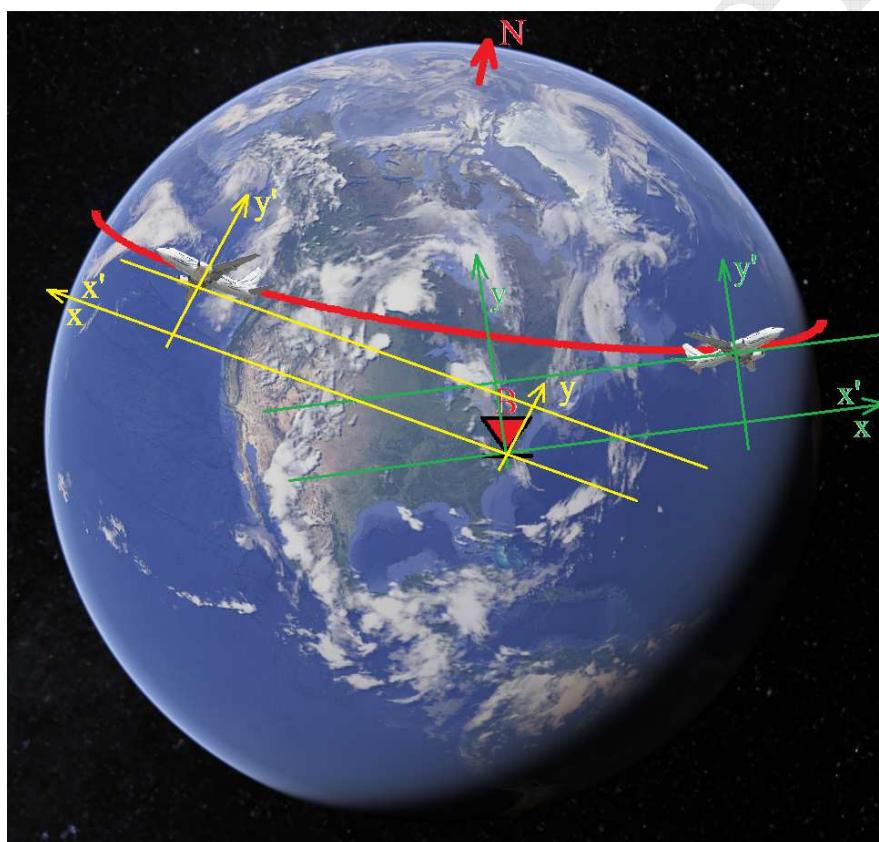


Bild A1.2: schematische Darstellung der Relativbewegung im HKE (Bild der Erde aus Google Earth)

¹⁰ es sind hier Standarduhren gemeint, also Uhren, die keinem Einfluss unterliegen, der physikalischen Anlass zu einem unterschiedlichen Lauf gibt. Üblicherweise werden diese Uhren als baugleiche Uhren vorausgesetzt.

Quellenangabe: Sydow, R. Auswertung des Hafele-Keating-Experiments Niederfinow (Deutschland) 06.06.2022
<https://rolfswelt.de/physik/#rt-auswertung-des-hafele-keating-experiments>

Revision: 1.3.1.8 vom 18.07.2023
copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Das Bild A1.2 zeigt, dass es für jede Position und Flugrichtung des Flugzeugs möglich ist, ein Koordinatensystem zu finden, dessen Abszisse mit der Flugrichtung des Flugzeugs übereinstimmt. Besser gesagt findet sich das Koordinatensystem nach dem von Einstein vorgegeben Muster. Es wird hier aber nicht der Stab auf die „X-Achse des ruhenden Koordinatensystems gelegt“ ([Ein] S. 895), sondern die x-Achse des anzuwendenden Koordinatensystems wird in die Richtung der Flugbahntangente gelegt. Dann folgt daraus, dass die x' -Achse des Inertialsystems des Flugzeugs auf der x-Achse der Bodenstation liegen kann.

Dass die sich im Flugzeug befindenden Uhren in einer y' -Position über der x' -Achse befinden, hat auf den Lauf der Uhren entsprechend den obigen Ausführungen keinen Einfluss auf ihren Gang.

Daraus leitet sich ab, dass gerade die Geschwindigkeit des Flugzeugs unabhängig von dessen Richtung als die Relativgeschwindigkeit anzunehmen ist.

Wie diese Geschwindigkeit im Fall des HKE zu ermitteln ist, ergibt sich aus der Geometrie und der Möglichkeit, eine Geschwindigkeit überhaupt zu ermitteln. Den Doppler-Effekt zu diesem Zwecke heranzuziehen, wird nicht gelingen, da bei der Umrundung der Welt nicht vollständig Sichtkontakt von der Bodenstation USNO zum Flugzeug besteht.

Die einzige und praktizierte Möglichkeit ist, die Geschwindigkeit des Flugzeugs über Boden (ground speed) zu ermitteln. Da das Flugzeug aber eine Höhe von etwa 9 km hat, wäre eine Korrektur erforderlich:

$$v = v_B \frac{R+h}{R} \quad \text{Gl. A1.1}$$

v Relativgeschwindigkeit des Flugzeugs

v_B Geschwindigkeit des Flugzeugs über Boden

R Erdradius (ggf. der Erdform anpassen)

h die Flughöhe über Boden

Die Differenz von v minus v_B ergibt sich für eine Geschwindigkeit von 800 km/h zu:

$$\Delta v = v - v_B = v_B \left(\frac{R+h}{R} - 1 \right) = 800 \frac{\text{km}}{\text{h}} \left(\frac{(6371+9)\text{km}}{6371 \text{ km}} - 1 \right) = 1,13 \text{ km/h}$$

Es bleibt zu konstatieren, dass bei strikter Anwendung der SRT und deren Regeln die Relativgeschwindigkeit zwischen den Uhren im Flugzeug und denen der Bodenstation im USNO gerade der Flugzeuggeschwindigkeit entspricht.



Anl. 2: die Weltumrundung ostwärts

Dass es keine Daten zu den durchgeföhrten Flügen im HKE gibt, ist nicht richtig. Die Routen der Flugzeuge wurden hinlänglich beschrieben. Diese Daten (siehe [Haf1] S. 273) wurden in eine Excel-Tabelle übernommen und mit Daten erweitert, um eine Auswertung der durchflogenen Route vorzunehmen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Erdradius	6371	[km]									
2	Höhe	8,9	[m]									
3	n. Br.	34	[°]									
4	Nr.	Station	Tag	Uhr	dez	d/a	Flug	Pause	Höhe	ö. L.	n. Br.	Weg
5	0	USNO	0	1930	19,5	d			85			
6	1	Dulles	1	12	24,2	d		4,7	86	-77,43	38,95	
7	2	London	1	656	30,9	a	6,7		22	-0,45	51,47	8606,8
8				1	814	32,2	d		1,3			
9	3	Frankfurt	1	909	33,1	a	0,9		101	8,55	50,03	1014,7
10				1	1036	34,6	d		1,4			
11	4	Istanbul	1	1248	36,8	a	2,2		36	28,8	40,97	2461,5
12				1	1357	37,9	d		1,1			
13	5	Beirut	1	1513	39,2	a	1,2		7	35,48	33,82	1088,23
14				1	1619	40,3	d		1,1			
15	6	Teheran	1	1813	42,2	a	1,9		1190	51,3	35,68	1773,38
16				1	1940	43,6	d		1,4			
17		Neu										
18	7	Delhi	1	2241	46,6	a	3,0		224	77,08	28,55	2971,12
19			2	0	48	d		1,3				
20	8	Bankok	2	333	51,5	a	3,5		7	100,73	13,68	3085,18
21			2	513	53,2	d		1,6				
22		Hong										
23	9	Kong	2	745	55,7	a	2,5		2	113,92	22,03	1733,85
24			2	855	56,9	d		1,1				
25	10	Tokio	2	1216	60,2	a	3,3		144	139,78	35,53	3224,15
26			2	1432	62,5	d		2,2				
27												
28	11	Honolulu	2	2110	69,1	a	6,6		2	158,07	21,03	7027,32
29			2	2314	71,2	d		2,07				
30		Los										
31	12	Angeles	3	350	75,8	a	4,6		12	118,15	33,82	4631,07
32			3	447	76,7	d		0,9				
33	13	Dallas	3	713	79,2	a	2,4		170	-97,02	32,88	2355,05
34			3	753	79,8	d		0,6				
35	14	Dulles	3	959	81,9	a	2,1		86	-77,43	38,95	2279,73
	15	USNO	3	1255	84,9	a		2,9	85			
							41,2	24,1		42252,27	[km]	
							65,4			Faktor	127,31	[%]

Tab A2.1: Daten des Ostwärtsfluges aus [Haf1] S. 273 Tab. II mit Daten ergänzt

Quellenangabe: Sydow, R. Auswertung des Hafele-Keating-Experiments Niederfinow (Deutschland) 06.06.2022

<https://rolfswelt.de/physik/#rt-auswertung-des-hafele-keating-experiments>

Revision: 1.3.1.8 vom 18.07.2023
copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Die Tabelle ist wie folgt aufgebaut:

Gelb unterlegt sind in Zeile 1 bis 3 einige Daten eingetragen.

Darunter befindet sich die Tabelle der Flugdaten mit folgenden Spalten:

Nr. die Laufende Nummer der betrachteten Station der Reise

Station Name des Flughafens oder der Station der Reise

Tag die Durchnummerierung der Tage des Fluges

Uhr die Uhrzeit in der Darstellung „hhmm“

dez Umrechnung dieser Uhrzeit in Dezimalschreibweise

d/a Hinweis auf den Flugstatus d = Abflug; a = Ankunft

Flug die Flugzeiten zwischen 2 Stationen (resultieren aus der Differenz der dezimalen Zeiten zwischen Ankunft am Flughafen und Abflug vom vorigen Flughafen)

Pause Die an einer Station verbliebenen Zeiten (resultieren aus der Differenz der dezimalen Zeiten zwischen Ankunft und Abflug an einem Flughafen)

Höhe aus google Earth wurden die Höhenlagen der jeweiligen Flughäfen ermittelt

ö. L. die östlichen Längen (resp. westlichen Längen mit negativem Vorzeichen) der Flughäfen

n. Br. die nördlichen Breiten der Flughäfen

Weg Berechnung der Wegstrecken zwischen den Flughäfen. Hier wurde die Formel zur Berechnung der Großkreise $\text{Weg} = \text{Arccos}(\text{Cos}(\text{ö.L.}) * \text{Cos}(\text{n.Br.}))$ herangezogen
Der Eintrag in der Exceltabelle ist dann:

$L8=ARCCOS(COS((J8-J7)/180*PI())*COS((K8-K7)/180*PI()))*(B1+B2)$

Für die Auswertung sind dann unter der Tabelle die folgenden Ergebnisse aufgeführt:

Im Feld G34 ist die Summe aller Flugzeiten berechnet.

Im Feld H34 ist die Summe aller Pausenzeiten berechnet.

Im Feld H35 ergibt sich dann die Summe der beiden Zeiten, die mit der angegeben Gesamtflugzeit des Experimentes übereinstimmt.

Im Feld L34 ist die Summe aller Wegstrecken berechnet. Die Wege zum und vom Flughafen Dulles wurde hier nicht berücksichtigt, weil der Autotransport keine Zeitdilatation erzeugen sollte.

Im Feld L35 wird dann der Faktor berechnet, der durch die Abweichungen vom theoretischen Flug über den Breitengrad zur Wegverlängerung gegenüber dem Breitengrad führt. Die dort eingetragene Formel ist:

$=L34/2/PI()/B1/COS(B3/180*PI())*100$ folgt aus dem Quotienten des ermittelten Weges in L34 durch den Umfang des in B3 gegeben Breitengrades beim Erdradius aus B1 in %.

Anl. 3: die Weltumrundung westwärts

Die Daten für den Westwärtsflug wurden ebenfalls aus der genannten Quelle entnommen und in eine Excel-Tabelle eingetragen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Erdradius	6371	[km]									
2	Höhe	9,36	[m]									
3	n. Br.	31	[°]									
4	Nr.	Station	Tag	Uhr	dez	d/a	Flug	Pause	Höhen	ö.L.	n. Br.	Weg
5	0	USNO	0	1940	19,7	d			85			
6	1	Dulles	0	2322	23,4	d		3,7	86	-77,43	38,95	
7		Los Angeles										
8	2	Angeles	1	400	28,0	a	4,6		12	-118,15	33,82	4564,1
9			1	503	29,1	d		1,1				
10	3	Honolulu	1	1014	34,2	a	5,2		2	-158,07	21,03	4631,4
11			1	1313	37,2	d		3,0				
12	4	Guam	1	2015	44,3	a	7,0		78	144,78	13,48	6399,8
13			1	2113	45,2	d		1,0				
14	5	Okinawa	2	6	48,1	a	2,9		36	127,77	26,35	2362,4
15			2	107	49,1	d		1,0				
16	6	Taipei	2	209	50,2	a	1,0		31	121,23	25,07	742,0
17			2	303	51,1	d		0,9				
18	7	Hong Kong	2	413	52,2	a	1,2		2	113,92	22,03	881,3
19			2	1248	60,8	d		8,6				
20	8	Bankok	2	1514	63,2	a	2,4		2	100,73	13,68	1734,0
21			2	1632	64,5	d		1,3				
22	9	Bombay	2	2006	68,1	a	3,6		7	72,87	19,08	3155,6
23			2	2115	69,3	d		1,2				
24	10	Tel Aviv	3	403	76,1	a	6,8		47	34,88	32,00	4433,2
25			3	509	77,2	d		1,1				
26	11	Athen	3	645	78,8	a	1,6		81	23,93	37,93	1384,8
27			3	733	79,6	d		0,8				
28	12	Rome	3	903	81,1	a	1,5		-3	12,25	41,80	1369,3
29			3	1001	82,0	d		1,0				
30	13	Paris	3	1138	83,6	a	1,6		113	2,53	49,02	1346,0
31			3	1425	86,4	d		2,8				
32	14	Shannon	3	1557	88,0	a	1,5		3	-8,90	52,70	1336,3
33			3	1706	89,1	d		1,1				
34	15	Boston	3	2338	95,6	a	6,5		2	-71,00	42,35	6970,2
35			4	118	97,3	d		1,7				
36	16	Dulles	4	226	98,4	a	1,1		86	-77,43	38,95	809,6
37			4	400	100,0	a		1,6	85			
38							48,7	31,7	[h]			42120,1
							80,3					122,8

Tab A3.1: Daten des Westwärtsfluges aus [Haf1] S. 273 Tab. II mit Daten ergänzt
Alle erforderlichen Erklärungen sind analog derer in Anlage 2 hier ebenso zutreffend.



Anl. 4: Uhrenvergleich aus unterschiedlichen Koordinatensystemen

In ihrem HKE gingen Hafele und Keating davon aus, dass die Zeitdilatation aus der Geschwindigkeit einer Uhr gegen ein im Kosmos ruhendes Inertialsystem (AI) resultiert (vgl. [Bui1]). Dieses Inertialsystem ist also im Kosmos ruhend und damit nicht beschleunigt und nicht rotierend. Wenn man 2 Uhren mit unterschiedlicher Geschwindigkeit relativ zu diesem AI betrachtet, dann weise jede Uhr gegen dieses AI eine Zeitdilatation auf.

Beginnt eine Zeitmessung dieser beiden Uhren an einem gleichen Ort und vollführen diese Uhren dann jeweils und auf anderem Wege einen Rundkurs durch den Raum, so sollen die Uhren beim Wiederaufeinandertreffen einer durch ihre Geschwindigkeit hervorgerufene Zeitdilatation unterliegen. Die jeweilige Zeitdilatation richtet sich dann für jede Uhr nach der Geschwindigkeit der Uhr gegen das gewählte AI.

Wie auf S. 6 zitiert wurde, geht Builder davon aus, dass dieselben Ergebnisse der auf den Uhren abzulesenden Zeiten mit ihren Dilatationen von jedem anderen Inertialsystem ebenfalls abzulesen wären. Hier ergibt sich die Frage, wie sich das beweisen lässt.

Builder ging von der folgenden Formel für die Zeitdilatationen aus:

$$dt_a/dt = (1 - u^2/c^2)^{1/2}; dt_b/dt = (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (\text{[Bui1] S. 280 Gl. 1}) \quad \text{Gl. A4.1}$$

Dabei bedeuten:

- dt_a ein Zeitintervall der Uhr A im System S'
- dt_b ein Zeitintervall der Uhr B im System S''
- dt ein Zeitintervall einer hypothetischen Uhr im AI (dort genannt S)
- u die Geschwindigkeit der Uhr A im AI
- v die Geschwindigkeit der Uhr B im AI
- c die Lichtgeschwindigkeit

Um den Rechengang gegenüber der Darstellung bei Builder zu vereinfachen, sei hier davon ausgegangen, dass es sich im Folgenden um ein Intervall handelt. Da keine Beschleunigung wirken darf, lässt sich vereinfachend feststellen:

$$t_a = \int_{t_1}^{t_2} (1 - u^2/c^2)^{1/2} dt; t_b = \int_{t_1}^{t_2} (1 - v^2/c^2)^{1/2} dt \quad (\text{vgl. [Bui1] S. 280 Gl. 2}) \quad \text{Gl. A4.2}$$

Daraus findet Builder, dass sich die Zeitdilatation zwischen den Uhren aus der Differenz der beiden Zeiten t_a minus t_b ergeben muss:

$$t_a - t_b = \int_{t_1}^{t_2} (1 - u^2/c^2)^{1/2} dt - \int_{t_1}^{t_2} (1 - v^2/c^2)^{1/2} dt; \quad (\text{vgl. [Bui1] S. 280 Gl. 3}) \quad \text{Gl. A4.3}$$

Builder stellt dann fest: „und es kann gezeigt werden, dass der Wert dieses Ausdrucks eine Invariante für alle Referenzsysteme und für alle Beobachter ist“ (f. ü. [Bui1] S. 280). Leider zeigt er es nicht und bleibt damit den Beweis seiner Aussage schuldig.



Die alleinige Aussage, dass „die Gleichungen (1)-(3) [siehe oben Gleichung Gl. A4.1 bis A4.3] genau dieselbe Form haben, wenn sie in den Verhältnissen eines jeden Inertialsystems ausgedrückt werden“ ([Bui1] S. 281), ist eher dürfzig. Gerade die Grundlage für dieses Argument – das Relativitätsprinzip der SRT – soll ja mit dieser Betrachtung widerlegt werden. Es wird postuliert, dass „ein einziges absolutes Inertialsystem existiert, so wie das Universum als Ganzes, das interagiert mit und beeinflusst das Verhalten von Uhren in der Weise, die von ihrer relativen Geschwindigkeiten zu ihm abhängen, d.h. ihrer absoluten Geschwindigkeiten“ (ebd. S. 282).

Weil diese Aussage existenziell für die Richtigkeit der SRT ist, soll der Ausdruck in hier genauer untersucht werden.

Da die Geschwindigkeiten der betrachteten Uhren gegenüber dem AI mit u und v angenommen wurden, soll nun ein beliebiges Inertialsystem I gewählt werden, dass mit einer Geschwindigkeit Δv zum AI bewegt. Es sei der Spezialfall betrachtet, in welchem die Relativgeschwindigkeiten der Uhr A relativ zum System I gerade den Wert $(u + \Delta v)$ und die der Uhr B den Wert $(v + \Delta v)$ annimmt. Dann sollte sich die Zeitdilatation nach Gleichung Gl. 3 zu:

$$t_a - t_b = \int_{t_1}^{t_2} (1 - (u + \Delta v)^2/c^2)^{1/2} dt - \int_{t_1}^{t_2} (1 - (v + \Delta v)^2/c^2)^{1/2} dt \quad \text{Gl. A4.4}$$

ergeben.

Wie immer solche Integrale wie in der Gleichung Gl. A4.4 in der SRT zu lösen wären, sei dahingestellt. Durch die in der „eingeschränkten Relativitätstheorie“ von Builder gemachten Definitionen von absoluten Geschwindigkeiten (s. o.) lassen sich diese Integrale aber sehr einfach lösen. Die in den Integralen stehenden Terme sind als Konstanten aufzufassen und damit für die Integration ohne Belang. Es ergibt sich der Zusammenhang:

$$t_a - t_b = \left[\sqrt{(1 - (u + \Delta v)^2/c^2)} - \sqrt{(1 - (v + \Delta v)^2/c^2)} \right] \Delta t \quad \text{Gl. A4.5}$$

Die Richtigkeit der von Builder gemachten Aussage hinsichtlich der Invariant der Zeitdifferenz $t_a - t_b$ wäre gegeben, wenn sich die Gleichung Gl. A4.5 auf die Gleichung Gl. A4.3 zurückführen ließe. Dabei sei unterstellt, dass die Gleichung Gl. A4.3 in identischer Weise integriert wird.

Es sollte offensichtlich sein, dass die Gleichheit der Gleichungen Gl. A4.3 und Gl. A4.5 nur dann gegeben sein kann, wenn die korrespondierenden Wurzelterme gleich sind.

$$\sqrt{(1 - (u + \Delta v)^2/c^2)} = \sqrt{(1 - u^2/c^2)} \quad \text{Gl. A4.5a}$$

$$\sqrt{(1 - (v + \Delta v)^2/c^2)} = \sqrt{(1 - v^2/c^2)} \quad \text{Gl. A4.5b}$$

Das kann aber ausschließlich dann funktionieren, wenn $\Delta v = 0$ wird. Wenn das dem geübten Auge sofort klar sein sollte, ist es auch schnell möglich, die Formeln Gl. A4.5a und Gl. A4.5b nach Δv umzustellen. Dann erhält man das Ergebnis auch.

Dabei spielt es keine Rolle, ob $\Delta v = f(\Delta v)$ eine Funktion von Δv ist, die u. U. aus dem Additionstheorem der Geschwindigkeiten resultieren könnte oder die an zunehmende Zeit t als Funktion $t_1 = f(t)$ nach Gleichung Gl. A4.1 ist.

Es wird auch nicht funktionieren, dass die Änderung des einen Wurzelterms sich durch die Änderung des anderen gerade aufhebt, solange u und v nicht identisch sind.

Eine Beispielrechnung für festgelegte Werte als Funktion der Geschwindigkeit v zeigt im Bild A4.1, dass es nur eine Übereinstimmung der beiden Differenzen $t_a - t_b$ für $u = v$ gibt. Damit wäre aber die Relativgeschwindigkeit zwischen Uhr A und B gerade null.

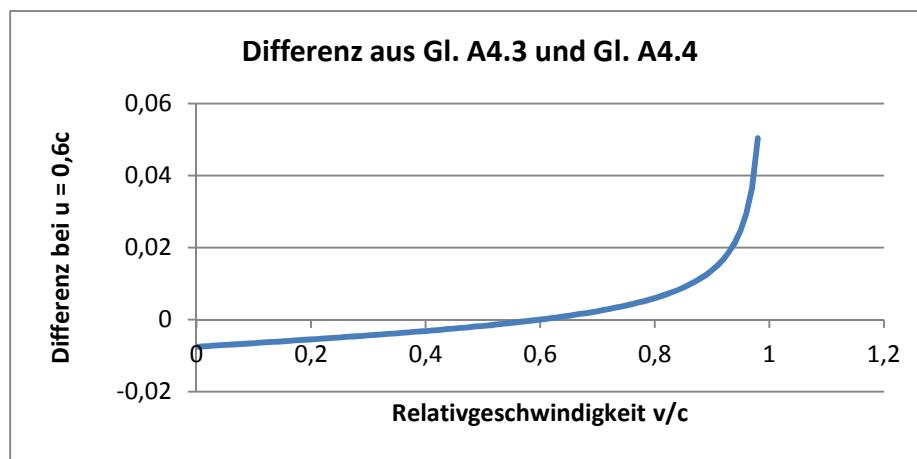


Bild A4.1: Darstellung einer Beispielrechnung für $u = 0,6c$ und $\Delta v = 0,01c$

Etwas anders lässt sich der Sachverhalt darstellen, wenn man die Gleichungen die Gl. A4.1 mittels Taylor-Entwicklung (siehe [Syd]) vereinfacht. Diese Vereinfachung ist in Analogie zum Beispiel 1 bei Sydow (ebd. S. 4) durchzuführen. Die o.g. Gleichung Gl. A4.1 würde dann die Form:

$$dt_a/dt = 1 - u^2/2c^2 \quad (\text{siehe Anl. 5}) \qquad \text{Gl. A4.6}$$

annehmen.

Transformierte man diese Gleichung in ein mit Δv relativ bewegtes Inertialsystem, änderte sich die Gleichung Gl. A4.4 wie folgt:

$$t_a - t_b = [(1 - (u + \Delta v)^2/2c^2) - (1 - (v + \Delta v)^2/2c^2)]t \qquad \text{Gl. A4.7}$$

Hier sind nun Vereinfachungen möglich:

$$t_a - t_b = [-(u + \Delta v)^2 + (v + \Delta v)^2]t/2c^2 \qquad \text{Gl. A4.8a}$$

$$t_a - t_b = [v^2 - u^2 - 2(u - v)^2\Delta v^2]t/2c^2 \qquad \text{Gl. A4.8b}$$

Damit ergibt sich dasselbe Ergebnis, wie in der Rechnung zuvor. Nur bei Gleichheit von $u = v$ wird der Einfluss der Relativgeschwindigkeit Δt eliminiert.

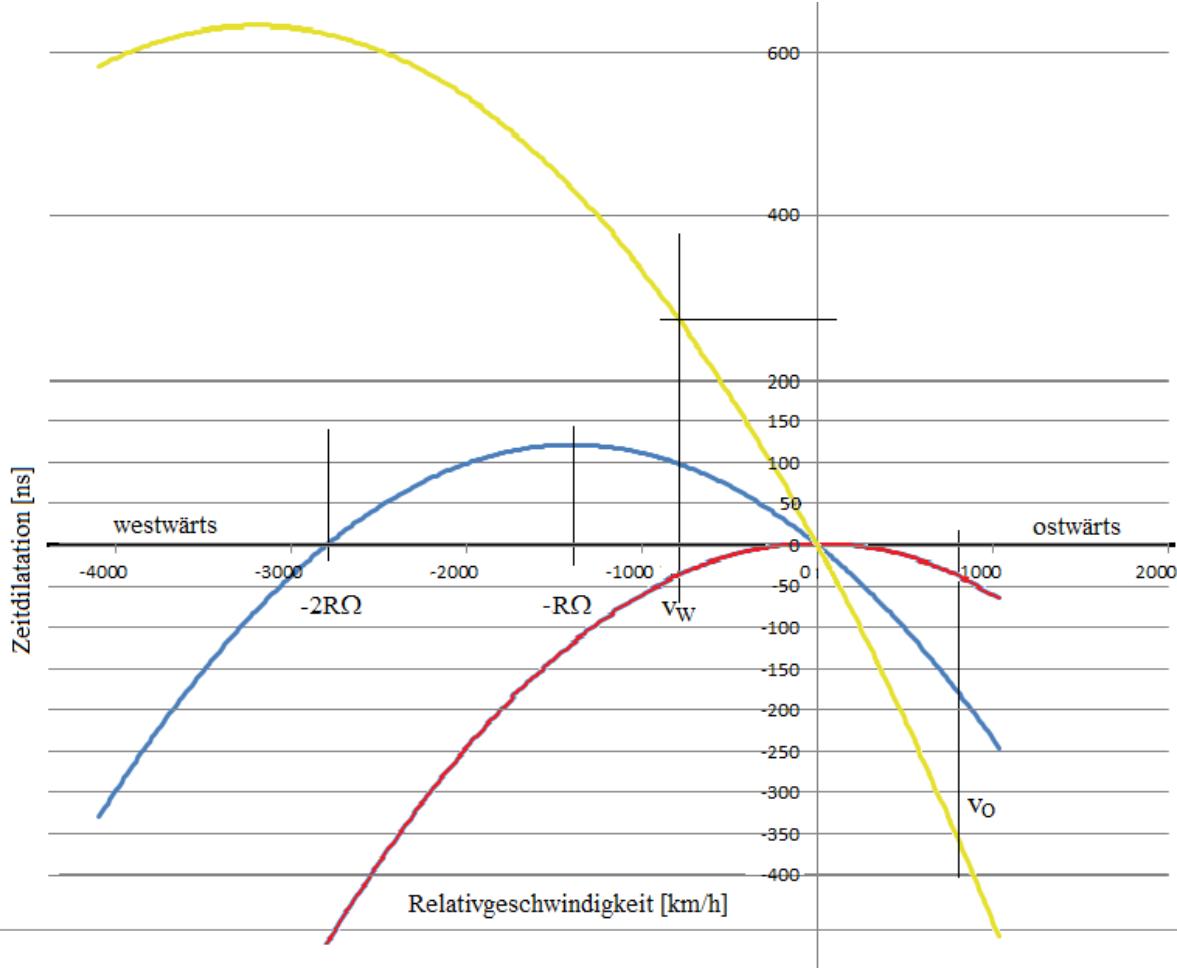


Bild A4.2: Darstellung der hypothetischen Zeitdilatation nach der Formel [Haf3] S. 166 Gl. 1 bei unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten der Erde

Das Bild A4.2 stellt 3 Kurven der Berechnung der Zeitdilatation nach dem Prinzip der hafeleschen Rechnung gegenüber einem ECI dar.

Die Relativgeschwindigkeit auf der Abszisse stellt die Geschwindigkeit an der Oberfläche eines rotierenden Planeten (z. B. der Erde) dar. Diese Relativgeschwindigkeit wird nach der Formel $v_E = R\Omega$ berechnet.

Die rote Kurve des Bildes A4.2 stellt die Zeitdilatation für die Relativgeschwindigkeit $v_E = 0$ dar. Diese Kurve entspricht der Rotationsgeschwindigkeit $\Omega = 0$ und zeigt damit den Fall der Zeitdilatation, wie er sich nach den Regeln der SRT darstellen würde. Es ist eine Symmetrie im Verlauf zu erkennen. Bei einer 40-stündigen Umrundung der Erde mit einer Bewegungsgeschwindigkeit der Uhren bezogen auf einen ruhenden Punkt auf der Erdoberfläche $t_0 = -t_w = 800 \text{ km/h}$ stellten sich die Werte für die Zeitdilatation von jeweils $\Delta\tau = -40 \text{ ns}$ ein.



Die blaue Kurve entspricht in etwa der Kurve, wie sie sich im HKE ergibt. Die Rotationsgeschwindigkeit der Erde ist hier mit $R\Omega = 1400 \text{ km/h}$ angenommen. Offensichtlich ist der Verlust der Symmetrie der Kurve bezüglich der Ordinate.

Bei einem 40-stündigen Flug mit derselben Geschwindigkeit der Uhren gegenüber der Erdoberfläche folgten die Zeitdilatationen $\Delta\tau_O = -178 \text{ ns}$ und $\Delta\tau_\Omega = 99 \text{ ns}$.

Es ist noch eine hypothetische Kurve gelber Färbung eingezeichnet. Diese Kurve stellt den Fall einer Rotationsgeschwindigkeit eines Planeten mit 3200 km/h dar. Bei gleichen Bedingungen in der Uhrengeschwindigkeit und der Umrundungszeit ergäben sich die Zeitdilatationen zu $\Delta\tau_O = -356 \text{ ns}$ und $\Delta\tau_\Omega = 277 \text{ ns}$.

Was zeigt dieses Diagramm?

Mit der unterschiedlichen Relativgeschwindigkeit der Planetenrotation, mit der das hypothetische und absolute Koordinatensystem AI festgelegt wird, ergeben sich völlig andere Ergebnisse für die zu erwartende Zeitdilatation der um die Welt fliegenden Uhren.

Insofern sollte klar sein, dass das ECI nicht beliebig wählbar ist.

Zu sagen dass nach den machschen Vorstellungen natürlich nur ein AI gewählt werden kann, welches gegen den Fixsternhimmel ruht, ist natürlich möglich. Das funktioniert dann allerdings ausschließlich für Rotationsbewegungen.

Sollte man aber, wie es in der SRT gefordert wird, sich auf Translationsbewegungen beziehen, ist das machsche Prinzip nicht mehr anwendbar und das AI kann nicht mehr eindeutig festgelegt werden.

Insofern liegt die Vermutung nahe, dass die eingeschränkte RT Builders sich ausschließlich auf Rotationsbewegungen anwenden lässt.

Da im eigentlichen Sinne der SRT wegen nicht erlaubter Beschleunigungen von Rotationen grundsätzlich abzusehen ist, stellt sich hier die Frage nach der Sinnfälligkeit der Überlegungen Builders.



Anl. 5: Herleitung der Formel Gl. 1 (s. S. 3)

In dieser Anlage wird der geschwindigkeitsabhängige Term der Zeitdilatation der Gleichung Gl. 1 hergeleitet. Die Gleichung berechnet eine relative Zeitänderung $\Delta\tau/\tau_0$. Das $\Delta\tau$ ist als Differenz $\tau - \tau_0$. Diese Zeitänderung setzt sich aus einem Gravitationspotential und einem Geschwindigkeitsquadrat zusammensetzt. Diese beiden Bestandteile sind mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c relativiert.

In dieser Anlage interessiert ausschließlich der rechte Term der Gleichung Gl. 1, der die geschwindigkeitsabhängige Zeitdilatation beschreibt.

$$d\tau/d\tau_0 = -(2R\Omega v + v^2)/2c^2$$

Gl. A5.1

Es ist im Vergleich zu den Formeln der SRT auffällig, dass der bekannte Ausdruck $\sqrt{1 - \beta^2}$ für den Relativitätskoeffizienten hier nicht zu finden ist. Deshalb ist die Frage, wie die Wissenschaftler in ihrer Arbeit auf einen Zusammenhang kommen, der diesen so typischen Ausdruck vermissen lässt.

Die Antwort ist, dass sie gerade von diesem Relativitätskoeffizienten ausgingen:

$$\tau = t\sqrt{1 - \beta^2} \quad (\text{mit } \beta = u/c)$$

Gl. A5.2

Das Verhältnis der Zeitdilatation τ/t folgt dann:

$$\frac{\tau}{t} = \sqrt{1 - \beta^2}$$

Gl. A5.3

In der Veröffentlichung von Hafele und Keating ([Haf3] S. 166) wird für die Relativgeschwindigkeit die Variable u verwendet, was dem hier nachvollzogenen Rechengang keinen Abbruch tut.

Mittels Taylor-Entwicklung lässt sich der Wurzelterm in Gleichung Gl. A5.3 in ein Polynom überführen (vgl. [Syd] S. 4 Gl. 10).

$$\frac{\tau}{t} \approx (1 - u^2/2c^2)$$

Gl. A5.4

Nimmt man nun an, dass ein Beobachter im ECI ruht, er sich beispielsweise über dem Nordpol der Erde befindet, dann hat eine am Äquator befindliche Uhr für ihn die Relativgeschwindigkeit:

$$u = R\Omega$$

Gl. A5.5

worin R der Erdradius und Ω die Winkelgeschwindigkeit der Erde sind.

Damit resultiert für diesen ruhenden Beobachter am Nordpol ein Zeitverhältnis zur Uhr am Äquator:

$$(1 - R^2\Omega^2/2c^2). \quad ([Haf3] S. 166)$$

Gl. A5.6

Für ein Flugzeug ist die Geschwindigkeit v des Flugzeugs zur Drehgeschwindigkeit hinzuzuziehen oder abzuziehen. Je nach der Flugrichtung ist das Pluszeichen für die Ostwärts-Bewegung und das Minuszeichen für die Westwärts-Bewegung zu verwenden. Es folgt somit



die Formel für die Zeitdilatation, die sich für das Flugzeug gegenüber dem Beobachter am Nordpol einstellt:

$$(1 - (R\Omega + v)^2 / 2c^2). \quad ([Haf3] S. 166) \quad \text{Gl. A5.7}$$

Jetzt sollte es offensichtlich sein, dass die Zeitdilatation zwischen der Bewegung des Flugzeugs und der Bewegung der am Äquator befindlichen Uhr gerade die Differenz dieser beiden Zeitdilatationen sein muss. Es folgt für die zu erwartende Zeitdifferenz der Uhr im Flugzeug zur Naval-Uhr am Äquator:

$$\frac{\Delta\tau}{\tau_0} = 1 - \frac{(R\Omega + v)^2}{2c^2} - 1 + \frac{R^2\Omega^2}{2c^2} \quad \text{Gl. A5.8}$$

Sind nun die Zeiten der Naval-Uhr mit τ_0 und die einer Uhr im Flugzeug mit τ gegeben, sollte sich die folgende Differenz zwischen den beiden Uhren einstellen:

$$\tau - \tau_0 = -(2R\Omega v + v^2)\tau_0 / 2c^2 \quad ([Haf3] S. 166) \quad \text{Gl. A5.9}$$

q. e. d.



Literatur

- [All] Alley, C. O.: Introduction to some fundamental concepts of general relativity and to their required use in some modern timekeeping systems
University of Maryland Maryland (USA) (12/1981) cited 11.02.2014
<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a494262.pdf>
- [Bis] Bislin, W.: Aviatik Faustformel, Sinkrate auf dem Gleitpfad
www unbekannt (Schweiz) (06.05.2014) cited 15.06.2022
<http://walter.bislins.ch/blog/index.asp?page=Aviatik+Faustformel%3A+Sinkrate+auf+dem+Gleitpfad>
- [Bui1] Builder, G.: Ether and Relativity
Australian Journal of Physics Vol. 11 pp 279 - 297 Sydney (Australien) (1958) cited 24.06.2022
<https://www.publish.csiro.au/ph/pdf/ph580279>
- [Bui2] Builder, G.: The Resolution of the Clock Paradoxon
Australian Journal of Physics 10(2) 246 - 262 Sydney (Australien) (1957) cited 25.06.2022
<https://www.publish.csiro.au/PH/pdf/PH570246>
- [Bur] Burt, E. G. C.: Relativistic Effects for Moving Terrestrial Clocks
Nature Physical Science Vol. 242 pp 95 - 95 London (England) (09.04.1973) cited 21.06.2022
<https://ur.booksc.me/book/52490030/f85ccb>
- [Eck] Eckstein, D.: Epstein erklärt Einstein
genius media AG Frauenfeld (Schweiz) 14.10.2008 cited 02.05.2014
<http://www.relativity.li/epstein/pdf-downloads.html>
- [Ein] Einstein, A.: Zur Elektrodynamik bewegter Körper
Annalen der Physik, Jg. 17, 1905, S. 891-921 Bern Juni 1905
http://www.pro-physik.de/Phy/pdfs/ger_890_921.pdf
- [Fre] Freund, J.: Spezielle Relativitätstheorie für Studienanfänger
vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich (UTB) Zürich (20.03.2007) cited 23.10.2008
<http://www.relativity.ch/kap03.pdf>
- [Fie] Field, J. H.: The Hafele-Keating experiment and internal detection of uniform translational motion
Universite de Geneve Genf (Schweiz) cited 04.05.2014
<http://relativity-myths.org.uk/jhfield/pdf/hkeintdmrr.pdf>
- [Haf1] Hafele J. C.: Performance and Results of portable Clocks in Aircraft
U.S. Naval Observatory Washington, D.C. (USA) (16.-18.11.1971) cited 26.11.2017
http://tycho.usno.navy.mil/ptti/1971papers/Vol%2003_17.pdf
- [Haf2] Hafele, J. C.; Keating, R. E.: Around-the-World Atomic Clocks; Observed Relativistic Time Gains
Science 177, 168-170 (1972) unbekannt (14.07.1972) cited 04.05.2014
http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jcuevas/Teaching/Hafele-Keating-Science-1972b.pdf



- [Haf3] Hafele, J. C.; Keating, R. E.: Around-the-World Atomic Clocks; Predicted Relativistic Time Gains
Science 177, 166-168 (1972) unbekannt (14.07.1972) cited 04.05.2014
http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jcuevas/Teaching/Hafele-Keating-Science-1972a.pdf
- [Haf4] Hafele, J. C.: Reply to Schlegel
Nature Physical Science Vol. 229 pp 237 f. Washington (USA) (21.10.1970) cited 21.06.2022
<https://ur.booksc.me/book/65834028/5a9a5b>
- [Haf5] Hafele, J. C.: Relativistic Behaviour of Moving Terrestrial Clocks
Nature Vol. 227 pp. 270 - 271 unbekannt (18.07.1970) cited 01.07.2022
<https://ur.booksc.me/book/10429451/e96ffa>
- [Heg] Hegmann, G.: Warum Passagierjets auf einmal knapp 1300 km/h schnell sind
Axel Springer SE Redaktion Welt Berlin (22.02.2019) cited 03.07.2022
<https://www.welt.de/wirtschaft/article189182427/Jetstream-Warum-Passagierjets-auf-einmal-knapp-1300-km-h-schnell-sind.html>
- [Mac] Mach, E.: Die Mechanik in Ihrer Entwicklung, historisch-kritisch dargestellt
F. A. Brockhaus Leipzig 3. Aufl. (1897) cited 09.07.2017
<https://archive.org/details/diemechanikinh05machgoog>
- [Mue] Mueller, G. O.: Über die absolute Größe der Speziellen Relativitätstheorie
google unbekannt (6/2004) cited 10.03.2014
<http://www.ekkehard-friebe.de/buch.pdf>
- [Scl] Schlegel, R.: Relativistic East-West Effect on Airborne Clocks
Nature Physical Science Vol. 229 pp 237 f. Michigan (USA) (21.10.1970) cited 21.06.2022
<https://ur.booksc.me/book/65834028/5a9a5b>
- [Scu] Schulz, J.: Direkte Messung der Zeitdilation, (Hafele-Keating)
www Schenefeld (23.05.2007) cited 14.06.2022
<http://www.xn--relativittsprinzip-ttb.info/experimente/hafele-keating.html>
- [Sex] Sexl, R.; Schmidt, H. K.: Raum - Zeit - Relativität
Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig / Wiesbaden 2. Aufl. 1979
- [Spe] Spencer, D. E.; Shama, U.: A New Interpretation of the Hafele-Keating Experiment
google Storrs (Connecticut), Bridgewater (Massachusetts) USA cited 16.10.2013
<http://www.shaping.ru/congress/english/spenser1/spencer1.asp>
- [Syd] Sydow, R. Die Größen n-ter Ordnung, wie man ein Polynom herstellt Niederfinow (Deutschland) 02.06.2022
<https://rolfswelt.de/mathematik/#reihen-taylor-reihe>