



ULRIK I. UGGERHØJ  
**SPECIEL  
RELATIVITETSTEORI**

AARHUS UNIVERSITETSFORLAG




# Speciel Relativitetsteori



# Speciel Relativitetsteori

Ulrik I. Uggerhøj

Aarhus Universitetsforlag 

*Speciel Relativitetsteori*

© Ulrik I. Uggerhøj og Aarhus Universitetsforlag 2016

Tilrettelægning og sats: Lars Madsen

Illustrationer: Lars Madsen og Troels Marstrand

Omslag: Nethé Elling Nielsen, Trefold; foto: Magnus I. Uggerhøj

Forsideillustration: Torben Ulrich

Forlagsredaktion: Simon Olling Rebsdorf

Sat med Kp-Fonts

Printed in Denmark 2016

eISBN 978 87 7184 233 3

Aarhus Universitetsforlag

Langelandsgade 177

8200 Aarhus N

[www.unipress.dk](http://www.unipress.dk)

Bogen er udgivet med støtte fra Aarhus Universitets forskningsfond

Kopiering fra denne bog må kun finde sted på institutioner, der har indgået aftale med Copydan, og kun inden for de i aftalen nævnte rammer.



**FAGFÆLLE-  
BEDØMT**

**/ I henhold til ministerielle krav betyder bedømmelsen, at der fra en fagfælle på ph.d.-niveau er foretaget en skriftlig vurdering, som godtgør denne bogs videnskabelige kvalitet.**

/ In accordance with requirements of the Danish Ministry of Higher Education and Science, the certification means that a PhD level peer has made a written assessment justifying this book's scientific quality.

# Indhold

|   |           |
|---|-----------|
| Forudsætninger og forslag til kapitelvalg . . . . .                 | v         |
| Introduktion . . . . .  | vii       |
| <b>1 Indledning</b>   | <b>1</b>  |
| <b>Del I: Fundamentet</b>   |           |
| <b>2 Et ur i bevægelse går langsomt</b>                             | <b>7</b>  |
| 2.1 Tidsforlængelse, lysuret . . . . .                              | 7         |
| <b>3 Samtidighed</b>  | <b>15</b> |
| 3.1 Synkronisering af ure . . . . .                                 | 15        |
| 3.2 Einsteins tog-eksperiment – mangel på absolut samtidighed . . . | 17        |
| <b>4 Et objekt i bevægelse er forkortet</b>                         | <b>23</b> |
| 4.1 Længdemåling af objekt i bevægelse . . . . .                    | 23        |
| <b>5 Den ultimative hastighed</b>                                   | <b>27</b> |
| 5.1 Lysets hastighed . . . . .                                      | 27        |
| 5.2 Massive partiklers bevægelse . . . . .                          | 28        |
| <b>6 Lorentz-transformationerne</b>                                 | <b>31</b> |
| 6.1 Hvorfor ikke Galilei-transformationerne? . . . . .              | 31        |
| 6.2 Krav til de nye transformationer . . . . .                      | 32        |
| 6.3 Udledning af Lorentz-transformationerne . . . . .               | 33        |
| 6.4 Rumtidsintervallet, den fire-dimensionelle ‘afstand’ . . . . .  | 37        |
| <b>7 Doppler-effekt</b>   | <b>41</b> |
| 7.1 Den ikke-relativistiske Doppler-effekt . . . . .                | 41        |
| 7.2 Den relativistiske Doppler-effekt . . . . .                     | 43        |
| 7.3 Ikke-parallele hastigheder . . . . .                            | 44        |
| <b>8 Afgørende eksperimenter og observationer</b>                   | <b>47</b> |
| 8.1 Michelson-Morley eksperimentet . . . . .                        | 47        |
| 8.2 Kennedy-Thorndike eksperimentet . . . . .                       | 51        |
| 8.3 Ives-Stilwell eksperimentet . . . . .                           | 52        |
| 8.4 Emissionsteorien og de Sitter . . . . .                         | 53        |
| 8.5 Myonens levetid i hvile . . . . .                               | 54        |

|                               |  |            |
|-------------------------------|--|------------|
| <b>9</b>                      | <b>Symmetri og Lorentz-transformationer</b>                          | <b>59</b>  |
| 9.1                           | Generel, lineær transformation . . . . .                             | 59         |
| 9.2                           | Bestemmelse af koefficienter ved symmetribetragtninger . . . . .     | 59         |
| 9.3                           | Bestemmelse af koefficienter ved lysglimt . . . . .                  | 63         |
| <b>10</b>                     | <b>Addition af hastigheder og Lorentz-faktorers transformationer</b> | <b>65</b>  |
| 10.1                          | Addition af parallelle hastigheder . . . . .                         | 65         |
| 10.2                          | Aberration . . . . .   | 73         |
| 10.3                          | Thomas-præcession* . . . . .   | 76         |
| 10.4                          | Fizeaus eksperiment med lys i vand . . . . .                         | 79         |
| 10.5                          | Transformation af Lorentz-faktorer . . . . .                         | 84         |
| <b>11</b>                     | <b>Kausalitet og lyskeglen</b>                                       | <b>87</b>  |
| 11.1                          | Lyskeglen . . . . .  | 87         |
| 11.2                          | Fremtid, fortid og andetsteds . . . . .                              | 88         |
| 11.3                          | Rumligt og tidsligt separerede begivenheder . . . . .                | 91         |
| 11.4                          | Lyskegle koordinater* . . . . .                                      | 91         |
| <b>12</b>                     | <b>Energi og impuls i relativitetsteorien.</b>                       | <b>95</b>  |
| 12.1                          | Lys og fotoner . . . . .   | 95         |
| 12.2                          | Einsteins kasse . . . . .  | 96         |
| 12.3                          | Cockcroft og Waltons eksperiment . . . . .                           | 98         |
| 12.4                          | Tyngdepunktssætningen . . . . .                                      | 99         |
| 12.5                          | Einsteins kasse uden sider . . . . .                                 | 100        |
| 12.6                          | Relativistisk masse, energi og impuls . . . . .                      | 102        |
| 12.7                          | Masse, energi og impuls igen . . . . .                               | 106        |
| <b>13</b>                     | <b>Lorentz-transformation af energi og impuls</b>                    | <b>109</b> |
| 13.1                          | Den relativistiske impuls . . . . .                                  | 109        |
| 13.2                          | Den relativistiske energi . . . . .                                  | 111        |
| 13.3                          | Lorentz-transformationen for energi og impuls . . . . .              | 112        |
| 13.4                          | Doppler-effekt igen . . . . .  | 113        |
| <br><b>Del II: Udvidelser</b> |  |            |
| <b>14</b>                     | <b>Ækvivalensprincippet og ure i tyngdefelter</b>                    | <b>117</b> |
| 14.1                          | To ure i en raket . . . . .  | 119        |
| 14.2                          | Frit faldende ure . . . . .  | 122        |
| 14.3                          | Energibevarelse . . . . .  | 124        |
| 14.4                          | Jordens centrum er yngre end overfladen . . . . .                    | 126        |
| 14.5                          | Eksperimentelle afprøvninger af ækvivalensprincippet . . . . .       | 129        |
| <b>15</b>                     | <b>Egentiden for et kastet objekt</b>                                | <b>133</b> |
| <b>16</b>                     | <b>Acceleration*</b>   | <b>137</b> |
| 16.1                          | Transformation af acceleration . . . . .                             | 137        |



|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 16.2      | Hastighed som funktion af tid . . . . .                                  | 138        |
| 16.3      | Sted som funktion af tid . . . . .                                       | 139        |
| <b>17</b> | <b>Sorte huller*</b>   | <b>145</b> |
| 17.1      | Begivenhedshorisont i et tyngdefelt . . . . .                            | 145        |
| 17.2      | Hawking-stråling fra sorte huller . . . . .                              | 147        |
| <b>18</b> | <b>Egentid, acceleration, hastighed og sted*</b>                         | <b>153</b> |
| 18.1      | Egentid, koordinattid og egen-acceleration . . . . .                     | 154        |
| 18.2      | Sted og hastighed som funktion af egentid og egen-acceleration . . . . . | 155        |
| 18.3      | Egentid og sted . . . . .  | 156        |
| <b>19</b> | <b>Rumtid og hyperbolske funktioner*</b>                                 | <b>157</b> |
| 19.1      | Trigonometriske funktioner . . . . .                                     | 157        |
| 19.2      | Hyperbolske funktioner . . . . .   | 158        |
| 19.3      | Rapiditet . . . . .  | 163        |
| 19.4      | To radioaktive partikler . . . . .                                       | 166        |
| <b>20</b> | <b>Tvillingeparadokset</b>   | <b>169</b> |
| 20.1      | Tvillingeparadokset med instantan hastighedsændring . . . . .            | 170        |
| 20.2      | Tvillingeparadokset med vilkårlig accelerationsfase . . . . .            | 174        |
| 20.3      | Tvillingeparadokset fra den accelererede tvillings synspunkt . . . . .   | 176        |
| 20.4      | Yderligere komplikationer i tvillingeparadokset . . . . .                | 179        |
| <b>21</b> | <b>Raketligningen*</b>   | <b>181</b> |
| 21.1      | Urelativistisk raketligning . . . . .                                    | 181        |
| 21.2      | Foton-raket . . . . .  | 181        |
| 21.3      | Relativistisk raketligning . . . . .                                     | 182        |
| <b>22</b> | <b><math>k</math>-calculus</b>   | <b>187</b> |
| 22.1      | Lyssignalers ping-pong . . . . .   | 187        |
| 22.2      | Lorentz-transformationer . . . . .                                       | 191        |
| <b>23</b> | <b>Tachyoner*</b>  | <b>193</b> |
| 23.1      | Overlyshastighed . . . . .   | 193        |
| 23.2      | 'Tachyon-telefonen' . . . . .  | 194        |
| <b>24</b> | <b>Fire-vektorer*</b>  | <b>197</b> |
| 24.1      | Definitioner . . . . .   | 197        |
| 24.2      | Enhedsvektorer og komponenter . . . . .                                  | 198        |
| 24.3      | Skalarproduktet . . . . .  | 198        |
| 24.4      | Fire-hastighed . . . . .   | 200        |
| 24.5      | Fire-impuls . . . . .  | 202        |
| 24.6      | Fire-acceleration . . . . .  | 206        |
| 24.7      | Fire-kraft, Minkowski-kraften . . . . .                                  | 207        |
| 24.8      | Tre-kraftens afhængighed af hastigheden . . . . .                        | 207        |
| 24.9      | Den elektromagnetiske felt-tensor** . . . . .                            | 209        |

## Indhold

|  |   |            |
|--|---|------------|
| <b>25</b>                              | <b>Lorentz-transformationer af elektriske og magnetiske felter*</b>                           | <b>213</b> |
| 25.1                                   | Magnetisme som et relativistisk fænomen . . . . .   | 214        |
| 25.2                                   | Lorentz-transformation af elektriske og magnetiske felter . . . . .                           | 216        |
| 25.3                                   | Elektrodynamiske invarianter . . . . .  | 222        |
| 25.4                                   | Parallele elektriske og magnetiske felter . . . . .   | 225        |
| 25.5                                   | En elektrons bevægelse, dens elektromagnetiske felt og<br>elektromagnetisk stråling . . . . . | 227        |
| <b>26</b>                              | <b>Kollisioner behandlet med fire-vektorer</b>  | <b>233</b> |
| 26.1                                   | Compton-spredning . . . . .   | 233        |
| 26.2                                   | Observation af Higgs-partiklen . . . . .  | 235        |
| <b>27</b>                              | <b>Anskueliggørelse af relativitet</b>  | <b>239</b> |
| 27.1                                   | Det 'kosmiske speedometer' . . . . .  | 239        |
| 27.2                                   | ' <i>Alt</i> bevæger sig <i>altid</i> med lysets hastighed' . . . . .                         | 243        |
| <b>28</b>                              | <b>Gravitationsbølger**</b>   | <b>245</b> |
| 28.1                                   | Gravitationsfelterne $\vec{g}$ og $\vec{h}$ . . . . .   | 247        |
| <b>29</b>                              | <b>Det Globale Positionerings-System, GPS</b>   | <b>253</b> |
| 29.1                                   | Basale elementer . . . . .  | 253        |
| 29.2                                   | Sagnac-effekt . . . . .   | 254        |
| 29.3                                   | Relativistiske korrektioner . . . . .   | 257        |
| <b>30</b>                              | <b>Alternativer til Einsteins specielle relativitetsteori*</b>                                | <b>261</b> |
| <br><b>Del III: Paradokser</b>         |   |            |
| <b>31</b>                              | <b>Stangspringer-paradokset</b>   | <b>265</b> |
| <b>32</b>                              | <b>Skøjteløber-paradokset</b>   | <b>271</b> |
| <b>33</b>                              | <b>Pladen-i-hullet paradokset*</b>  | <b>277</b> |
| <b>34</b>                              | <b>Bells raket-reb paradoks*</b>  | <b>283</b> |
| <b>35</b>                              | <b>Rindler-kilen**</b>  | <b>289</b> |
| <b>Appendix: Matematiske værktøjer</b> |   | <b>297</b> |
| A                                      | Pythagoras' sætning . . . . .   | 297        |
| B                                      | Rækkeudviklinger . . . . .  | 298        |
| Litteratur                             |   | 301        |
| Indeks                                 |   | 315        |

# Forudsætninger og forslag til kapitelvalg

Minimale forudsætninger: Du kan løse ligningen  $x^2 - 4 = 0$  og isolere  $x$  i  $y = 1/\sqrt{1-x^2}$ , du ved hvad en vektor er, og du er fortrolig med basal integration og differentiation i én dimension – du kan f.eks. differentiere funktionen  $f(x) = x^a$  mht.  $x$  – samt med løsningen af en bevægelsesligning vist i et koordinatsystem.

Forslag til kapitelvalg:

- M* Kap. 2–6  
Minimum for at opnå en fornemmelse af hvad speciel relativitetsteori er.
- A* *M* + kap. 7–8, 11–12, 14, 27 og 29  
Niveau for 3.g, f.eks. ifbm. studieretningsprojekt (SRP).
- B* *A* + kap. 9–10, 13, 20, 22  
Avanceret niveau for 3.g, f.eks. ifbm. SRP.
- C* *B* + kap. 19, 23, 24 (til og med 24.6), 26, 31  
5 ECTS kursus, 140 timer, på universitetets første år.
- D* *C* + kap. 15–16, 17–18, 21, 32–34  
10 ECTS kursus, 280 timer, på universitetets første år
- E* *D* + kap. 24 (24.7–24.9), 25, 28 og 35  
Kræver – i det mindste delvist – kendskab til elektrodynamik, lineær algebra og partiel differentiation



# Introduktion

Eftersom resten af denne bog handler om den tysk-amerikanske teoretiske fysiker Albert Einsteins (1879–1955) specielle relativitetsteori, udgivet i 1905 [1], er det i forbindelse med kunstværket på forsiden måske på sin plads med et eksempel på Einsteins eget syn på kunst [2]:

Personligt finder jeg den højeste grad af lykkefølelse ved store *kunstværker*.  
Fra dem får jeg lykkelige følelser af en sådan styrke jeg ikke kan opnå fra andre områder.

Kunstværket er af tennisspilleren og kunstneren Torben Ulrich, som jeg har haft fornøjelsen af at møde et par gange i San Francisco for bl.a. at diskutere fysik. Jeg vil gerne her takke ham for venligt at have givet mig tilladelse til at benytte hans kunstværk som forside.

Det er en del af en serie med navnet ‘Imprints of Practice’, der kan oversættes til noget i retning af ‘aftryk af øvelse’. Og det er netop pointen med denne bog, at øvelse vil efterlade et aftryk: Forvent ikke, at du kan læse bogen fra a til å, og at du derefter vil mestre teorien. Derimod, øv dig i at eftervise ligningerne i detalje, stil dig selv nye spørgsmål, og løs opgaver – det er vejen frem. Hermed min serv, som forhåbentlig kan få dit spil i gang.

Bogen er skrevet med ambitionen om at kunne bruges såvel af de dygtige stx- og htx-elever, der ønsker at udfordre sig selv med et emne, der rækker ud over det almindelige pensum, som af den interesserede ingeniør, hvoraf jeg har mødt mange i forbindelse med mine foredrag, hvor de ofte stiller meget kvalificerede spørgsmål. Sidst, men ikke mindst, er bogen til de studerende i fysik på universitetet på de(t) første år. Til sidstnævnte har jeg i nogen udstrækning sat referencer til standardlærebogen til bl.a. mekanik og elektromagnetisme ind for at lette forståelsen af sammenhænge med andre grene af fysikken [3]. Til førstnævnte målgruppe vil visse kapitler være en udfordring, der måske kan ende med at tage modet fra dem, og for at hjælpe med at sortere disse kapitler fra, har jeg markeret de svære kapitler med en stjerne (\*), i visse tilfælde med to (\*\*), for at understrege den øgede sværhedsgrad, i overskriften. Ved den første gennemgang kan disse markerede kapitler undværes.

Bogen udvider det stof, man normalt behandler i lærebøger om den specielle relativitetsteori, ved at omfatte adskillige tilgrænsende fænomener, der dog alle har en vis relation til hovedemnet. Der er derfor betydeligt mere stof end man

kan nå at gennemgå i løbet af et standard-kursus på universitetet, hvilket giver læseren og/eller underviseren mulighed for at vælge emner, der virker særligt interessante.

Men – kort sagt – hvorfor er den specielle relativitetsteori overhovedet relevant? Det er den, fordi den menes at være gældende for *alle* former for fysiske vekselvirkninger, på nær for tyngdefænomener af større skala hvor den generelle relativitetsteori gør sig gældende. Den specielle relativitetsteori er en hjørnesten i den moderne fysiks behandling af elementarpartiklernes vekselvirkninger, og i udviklingen af nye teorier behøver man normalt kun at overveje de teorier, der er konsistente med – og eventuelt udvider – den specielle relativitetsteori (en undtagelse omtales i [Kapitel 30](#)). Sammen med kvantemekanikken kan den specielle relativitetsteori forudsige eksperimentelle resultater med en præcision på – i visse tilfælde – bedre end én ud af en million millioner.

De basale ting i relativitetsteorien kan man lære uden de helt store *matematiske* komplikationer: Behersker man at kvadrere ('sætte i anden') og uddrage en kvadratrods, kan man komme meget langt. Derimod er den *begrebsmæssige* dimension en virkelig udfordring. Som eksempel kan nævnes historien genfortalt i kapitlet om [Bells raket-\*reb\* paradoks](#), [Kapitel 34](#), hvor omdrejningspunktet for den berømte irske fysiker John Stewart Bell (1928–1990) var at selv for folk, der må forventes at beherske relativitetsteorien til fulde, kan intuitionen svigte og føre til forkerte resultater. Et andet eksempel er det såkaldte [tvillingeparadoks](#), som strider kraftigt mod hverdagens erfaringer, og som der derfor stadig udgives forskningsartikler om. En ting har stort set alle disse paradokser tilfælles: Det er vigtigt *altid* at gøre sig klart, hvem der spørger om hvad, hvordan de modtager deres information, og hvor, og hvad deres ur viser når de modtager. Relativitetsteorien er til tider meget mod-intuitiv, og man kan let lade sig snyde af forventninger baseret på opfattelser fra dagligdagen.

Dele af bogen har tidligere været udgivet som noter til min undervisning, og til at underbygge mine påstande i de populærvidenskabelige bøger jeg har skrevet om tid, anskuet fra relativitetsteorien [[4](#), [5](#)]. Adskillige fænomener er her behandlet på flere forskellige måder, f.eks. [Lorentz-transformationerne](#), der vises direkte ved sammenligning af koordinatsystemer, ved symmetribetragtninger og i den såkaldte *k-calculus*. Jeg håber dermed at vise, at det ikke blot er en ganske særlig tilgang, der giver forståelsen af de, trods alt, meget bemærkelsesværdige og til tider forbavsende, fænomener som relativitetsteorien byder på.

Idet det er min erfaring, at opgavesæt bør udvikles løbende for at virke bedst, har jeg valgt ikke at inkludere opgaver i denne bog. Derimod kan opgavesæt, samt i mange tilfælde tilhørende løsningsforslag, hentes fra siden

<http://users-phys.au.dk/ulrik/specrel/>

Jeg må allerede her indrømme, at der kun er ganske få ting i denne bog, som man ikke kan finde i andre bøger og artikler, men at man trods alt skal stykke temmelig mange af dem sammen for at finde det hele, og det er på engelsk i

næsten alle tilfælde. Mit håb er, at en bog på dansk kan udfylde et behov hos ovennævnte målgruppe.

Oversættelser af citater er mine egne, i de fleste tilfælde direkte fra originalsproget. Undervejs i teksten optræder navne på mange fysikere, og jeg har valgt at præsentere – med f.eks. fødeår og fornavn – de fysikere der efter min mening har haft stor betydning, hvorimod andre eksempelvis ‘blot’ har lagt navn til en bestemt effekt eller måling, hvorfor de blot kort bliver nævnt.

Mange personer har bidraget til denne bog, og jeg vil gerne her nævne Axel Svane (AU), der skrev de første versioner af et par af kapitlerne – og venligt gav tilladelse til at lade dem inkludere her, i en omarbejdet version. En stor tak til min kollega Allan Sørensen (AU), der har læst mange af kapitlerne, og fundet et par af mine fejltagelser og en lapsus eller to i manuskriptet. Allan har været yderst behjælpelig med at gøre indholdet mere klart. Også en stor tak til Helge Knudsen (AU) – en anden af mine læremestre – der har gennemgået teksten ‘med tættekam’. Ligeledes tak til Peter Kjeldsen (Rosborg Gymnasium), der har luget ud hvor min argumentation har været forkert eller for kort. Endvidere vil jeg gerne takke Troels Marstrand for tilladelse til at genanvende nogle af hans flotte illustrationer samt min redaktør, Simon Olling Rebsdorf (Aarhus Universitetsforlag), der ligeledes meget professionelt har gennemgået alt med stor omhu. Jeg er taknemmelig for en særdeles velvillig og yderst kvalificeret hjælp fra adskillige teknikere der har bidraget til nogle af de eksperimentelle resultater, herunder Per B. Christensen, Erik Loft Larsen og Poul Aggerholm. Desuden en tak til Aarhus Universitets Forskningsfond og NICE, <http://nice.ku.dk/>, der gav økonomisk støtte til dette bogprojekt og NICE tillige til adskillige af forskningsresultaterne nævnt heri. Sidst, men ikke mindst, en tak til de mange dygtige studerende jeg har haft gennem årene - uden jer havde dette projekt ikke kunnet lade sig gøre.

En særlig tak til Lars ‘daleif’ Madsen, der har ydet et enormt bidrag til opsætningen af figurer, tilretning af tekst og i det hele taget har lappet utallige steder, især på mine manglende evner indenfor L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, det tekstop sætningssystem som bogen er skrevet i. En kort historie om [Figur 26.3](#) (Higgs bosonen) kan illustrere Lars’ grundighed: Jeg kontaktede ATLAS-eksperimentet ang. tilladelse til at anvende deres figur i denne bog. Jeg fik tilladelsen, men kun til den engelske version, ikke til at oversætte den. I mellemtiden opdagede Lars, at den omtalte figur var behæftet med adskillige grafiske mangler, utilstrækkelige skrifttyper osv., samtidig med at jeg opdagede, at den indsatte formel i sin opsætning var mildest talt forvirrende. Efter at have rettet alle disse fejl, justeret og lavet versioner af figuren på dansk og engelsk, bad vi igen om tilladelse. Denne gang fik vi den – også til den danske version – samtidig med en anmodning om ikke at ATLAS (der tæller omkring 3000 fysikere fra 175 institutioner verden over) kunne få vores version, så de fremover kunne benytte en pænere udgave.

Og her, til allersidst inden første serv, vil jeg gerne takke min familie, især min kone Malene og vores tre børn, Magnus, Sebastian og Caroline, for overbærenhed og tålmodighed under min lange skriveproces, og for utallige gode timer sammen.





# Kapitel 1

## Indledning

Et bærende princip i relativitetsteorien er, at naturlovene ikke afhænger af, hvilket referencesystem – et rumligt koordinatsystem forsynet med en tidsmåling [3, s. 110] – man benytter, når man nedskriver dem. Det er på sin vis udtryk for en meget pragmatisk holdning, idet man ellers f.eks. ville være tvunget til at forsyne enhver fysik-lærebog med en instruks om, hvordan man skal bevæge sig, og i forhold til hvad, når man benytter formlerne deri. Det ville mildest talt være en kompliceret situation: “*da jeg satte tal ind i formlen, bevægede jeg mig i syd-østlig retning med 32 km/t i forhold til Jorden.*” I den specielle relativitetsteori, der som navnet siger, er et specialtilfælde af den generelle – eller almene – relativitetsteori, indskrænkes kravet om referencesystemer til, at der skal være tale om et inertialsystem. Et inertialsystem er et referencesystem, hvori inertiens lov (Newtons 1.) gælder [3, s. 131], eller sagt på en anden måde: et system, der ikke accelererer og ikke er udsat for tyngdekræfter.

Relativitetsprincippet gældende i den specielle relativitetsteori kan kort udtrykkes:

### **Postulat 1 (Relativitetsprincippet)**

*Naturlovene er ens i alle inertialsystemer.*

Dog, som Einstein selv har pointeret [6], er der en svaghed i definitionen af inertiens lov og dermed af inertialsystemet, nemlig at den indeholder en form for cirkelslutning: En masse bevæger sig uden acceleration, hvis den ikke er påvirket af nogen kraft, men den eneste måde hvorpå vi ved, at den ikke er påvirket af nogen kraft er ved at konstatere, at den ikke accelererer. Denne svaghed leder logisk hen til den generelle relativitetsteori, der behandler *alle* referencesystemer, men da den generelle teori er – matematisk set – en del mere krævende end den specielle, vil vi kun berøre den som en tilnærmelse baseret på den specielle relativitetsteori. Men man kan komme meget langt i retning af den generelle relativitetsteori blot ved at benytte den specielle relativitetsteori i kombination med det såkaldte ækvivalensprincip, som vi skal se.

Det er i dag et meget velafprøvet faktum, at lysets hastighed  $c$  gennem det tomme rum altid er den samme. Allerede i midten af 1960'erne blev det på det fælleseuropæiske forskningscenter CERN eksperimentelt undersøgt, i hvilken