



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Imperfect Fabry-Perot resonators

Klaassen, T.

### Citation

Klaassen, T. (2006, November 23). *Imperfect Fabry-Perot resonators*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4988>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4988>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

---

## Samenvatting

---

In deze samenvatting wordt het idee van dit proefschrift uitgelegd zodanig dat het ook te begrijpen is voor mensen die minder ingevoerd zijn in de Natuurkunde. De titel van dit proefschrift luidt ‘Imperfecte Fabry-Perot resonatoren’. Om het onderwerp van dit proefschrift te kunnen begrijpen, zal de titel stapsgewijs ontleed en uitgelegd worden. In paragraaf S.1 wordt de werking van een resonator verklaard. Een resonator of trillholte is een ‘holte’ waarin een golf kan ‘trillen’ en daarbij vanwege de opsluiting wordt versterkt. Om dit zo duidelijk mogelijk uit te leggen, maken we een vergelijking met geluid, voordat we ons richten op licht. In paragraaf S.2 zullen we ons beperken tot licht en de werking en de toepassing van de optische Fabry-Perot resonator nader uit de doeken doen. De verschillende soorten optische resonatoren worden geïntroduceerd in paragraaf S.3. Vervolgens maken we de stap van ideale resonatoren, d.w.z. resonatoren met perfecte spiegels, naar niet-ideale resonatoren. In paragraaf S.4 worden deze afwijkingen van de ideale spiegel en de consequenties voor een resonator besproken. Deze afwijkingen vormen de rode draad door dit proefschrift. In paragraaf S.5 wordt het begrip chaos verklaard en in paragraaf S.6 wordt de weerslag van mijn onderzoek besproken.

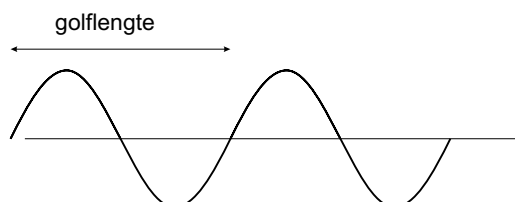
### S.1 De resonator

Het woord ‘resoneren’ komt uit het Latijn en is opgebouwd uit de woorden *re* en *sonare*. Het betekent zoveel als ‘terug geluid geven’ of ‘herklinken’. Je zou het ook vrij kunnen vertalen met ‘meetrillen’. Een glas gaat niet alleen meetrillen als je er tegen aan tikt, maar ook als je luid genoeg op de juiste toonhoogte zingt. Het glas kan zelfs zo hard mee gaan trillen dat het stuk gaat. Ook als soldaten *in* de pas lopen kunnen resonanties optreden. Dit is de reden dat soldaten *uit* de pas gaan lopen als ze over een brug heen gaan. Anders kan de brug zo erg mee gaan trillen (dus resoneren), dat ze het kan begeven. In contrast met deze wat destructieve voorbeelden wordt resonantie ook in de praktijk gebruikt in sommige apparaten en instrumenten. Deze bevatten dan een aparte ruimte, ook wel ‘resonator’ genoemd, om de

## Samenvatting

resonanties te stimuleren en te controleren. Je kunt hierbij denken aan de klankkast van een gitaar, een orgelpijp of de box van de luidspreker.

Voordat we de vraag kunnen beantwoorden wanneer iets resonanceert, moeten we iets meer weten over de eigenschappen van licht en geluid. Zowel licht als geluid zijn golven die zich voortbewegen. Een belangrijke eigenschap van een golf is, zoals aangegeven in figuur S.1, de lengte van één periode, ook wel genaamd de golflengte. In de akoestiek bepaalt de golflengte de *toonhoogte*; hoge tonen hebben een kortere golflengte dan lage tonen. Dit is de reden dat een korte orgelpijp veel hogere tonen produceert dan een langere orgelpijp. In de optica bepaalt de golflengte de *kleur* van het licht. Blauw licht heeft een kortere golflengte dan rood licht. Behalve dat licht een trilling van een elektromagnetisch veld is, terwijl geluid een trilling is van de lucht, is er ook een belangrijk verschil in de golflengtes. Geluid heeft een golflengte in de orde van centimeters tot meters, terwijl licht een golflengte heeft van een fractie van een micrometer, een miljoenste deel van een meter. De golflengte van licht is hiermee ongeveer 100 keer kleiner dan de dikte van een mensenhaar!

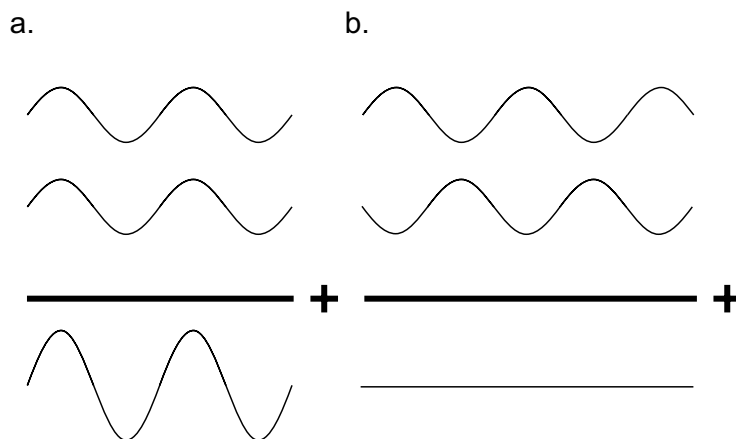


**Figuur S.1:** Licht en geluid bestaan uit golven die zich voortbewegen. Typierend voor een golf is de lengte van één periode, ook wel genaamd de golflengte.

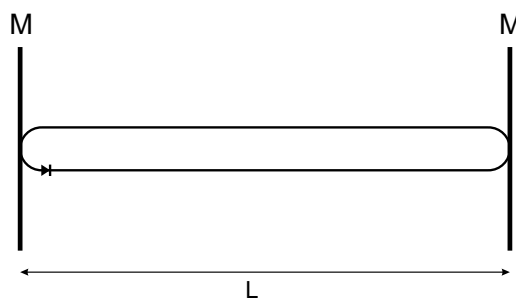
Met deze kennis kunnen we de vraag beantwoorden wanneer licht of geluid in een resonator resonanceert. Dit gebeurt als de halve golflengte, of een geheel aantal halve golflengtes, precies past in de resonator en dus gelijk is aan de lengte van de resonator. In het geval van een snaar is de halve golflengte dus gelijk aan de lengte van de snaar. Een golf beweegt zich voort en reflecteert (draait om) aan het einde van de snaar. Als de gereflecteerde golf precies hetzelfde is als de nieuwe golf aan het begin van de snaar (de golven ‘passen’ in de resonator) noemen we dit ook wel constructieve interferentie. Alle golven met dezelfde golflengte versterken elkaar. Dit is schematisch weergegeven in figuur S.2a. Als de golflengte niet past dan zullen meerdere golven elkaar uitdoven. Dit heet ook wel destructieve interferentie en is weergegeven in figuur S.2b.

We laten de vergelijking met de akoestiek nu definitief achter ons en richten ons op de resonantie van licht. Een optische resonator of Fabry-Perot resonator bestaat uit twee spiegels die parallel tegenover elkaar staan. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur S.3. Licht tussen de spiegels, aangegeven met een *M*, reflecteert elke keer als het één van de spiegels raakt en loopt dus heen en weer. Het licht wordt een tijdje opgeslagen. Deze resonator is vernoemd naar de heren Fabry en Perot, die deze resonator voor het eerst bouwden in 1899.

We weten ondertussen dat één bepaalde kleur licht resonanceert, oftewel constructief interfereert, als één halve golflengte (of een geheel aantal halve golflengtes) gelijk is aan de afstand tussen de spiegels. Is dit niet het geval, dan treedt destructieve interferentie op en dooft het licht in de trillholte uit. Als we nu wit licht, dat bestaat uit alle kleuren, een resonator insturen,



**Figuur S.2:** Schematische weergave van interferentie, waarbij golven elkaar kunnen versterken of uitdoven. In figuur a zijn de twee golven niet verschoven ten opzichte van elkaar. Als twee golven elkaar tegenkomen mogen we ze optellen. Het resultaat is een golf met dezelfde golflengte maar met een twee keer zo grote uitwijking. De twee golven versterken elkaar dus, dit heet ook wel constructieve interferentie. In figuur b zijn de twee golven ten opzichte van elkaar geschoven zodat de pieken van de ene golf samenvallen met de dalen van de ander. Als deze golven elkaar tegenkomen en we tellen ze weer bij elkaar op dan doven ze elkaar uit. Dit heet ook wel destructieve interferentie.



**Figuur S.3:** Schematische weergave van een Fabry-Perot resonator, bestaande uit twee vlakke spiegels. De spiegels zijn aangeduid met een M en staan op een afstand L van elkaar. Doordat de spiegels reflecteren loopt het licht rond door de resonator en wordt het tijdelijk opgeslagen.

zullen bepaalde kleuren (= specifieke golflengtes) precies passen in de resonator en andere niet. De kleuren die passen, overleven terwijl de andere kleuren uitdoven. Een resonator werkt dus als een filter voor de verschillende kleuren licht.

Bij resonantie van geluid kunnen we ons waarschijnlijk meer voorstellen, maar ook de resonantie van licht kennen we van nabij. Denk bijvoorbeeld aan een dun olielaagje op een plas water of anders een zeepbel. We zien in reflectie allerlei kleuren in de zeepbel of het olielaagje. We zien alleen die kleuren waarvoor geldt dat de dikte van het olielaagje of het zeepsop gelijk is aan een geheel aantal halve golflengtes. De andere kleuren passen niet precies en doven wederom uit. Eigenlijk zijn zowel het olielaagje als de zeepbel simpele voorbeelden van een optische resonator. Een belangrijk verschil met de resonatoren gebruikt in dit onderzoek is dat onze spiegels veel beter reflecteren dan de laagjes olie of zeepsop. Het laagje zeepsop reflecteert ongeveer 2 % van het invallende licht, terwijl een goede spiegel meer dan 99 % van het licht reflecteert. Het licht wordt tussen onze twee spiegels dus veel langer opgeslagen.

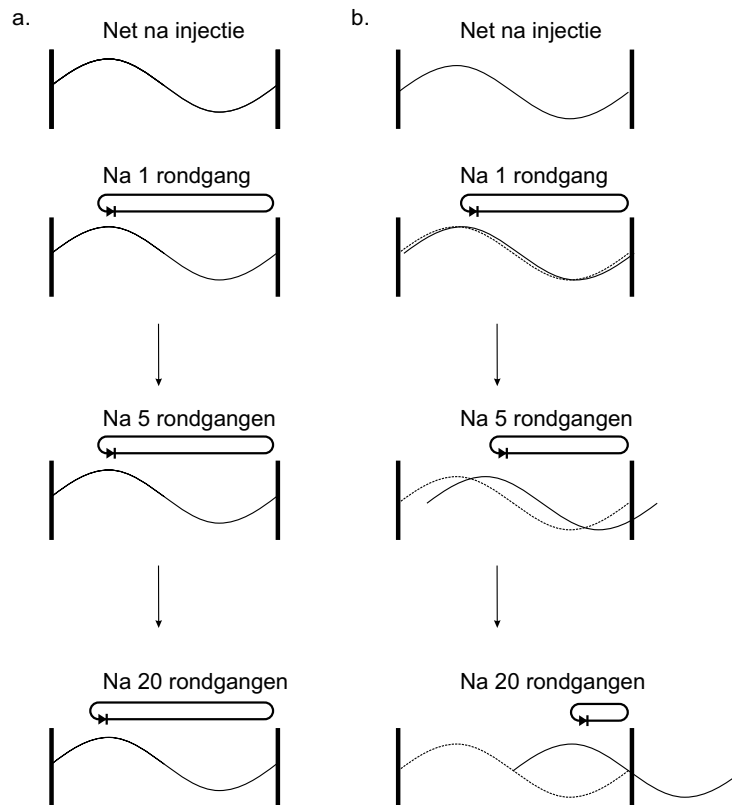
## S.2 Werking van de optische resonator

De reden dat de optische resonator zoveel wordt gebruikt in experimenten en toepassingen ligt in zijn vermogen om kleuren te scheiden. Twee verschillende kleuren, bijvoorbeeld geel en oranje, die een golflengteverschil van 0.02 micrometer hebben, kun je makkelijk met het blote oog onderscheiden. Een optische resonator met goed reflecterende spiegels kan veel kleinere kleurverschillen zichtbaar maken, tot wel één miljoenste deel van een micrometer!

Hoe werkt dit precies? Een hoog kleurscheidend vermogen ontstaat doordat de resonator één specifieke golflengte doorlaat, maar golflengtes die een klein beetje langer of korter zijn niet. Hoe langer het licht rond loopt in de resonator, hoe kleiner het golflengtebereik dat doorgelaten wordt en des te groter dus het kleurscheidend vermogen (kleinere kleurverschillen kunnen zichtbaar gemaakt worden).

Om dit goed te kunnen begrijpen doen we een experiment. We beschijnen een optische resonator met twee verschillende kleuren licht, die bijna dezelfde golflengte hebben. Eén van beide golflengtes past precies in de resonator en de andere golflengte is net een beetje te lang om goed te passen. We kijken nu wat er gebeurt met beide golven na respectievelijk één, vijf en twintig rondgangen ten opzichte van de golf net na injectie. De verschuiving van de golf na een aantal rondgangen ten opzichte van de golf net na injectie, bepaalt of beide golven constructief of destructief interfereren (zie figuur S.2). We beginnen met de golflengte die precies past, zoals afgebeeld in figuur S.4a. We zien dat na één, vijf en twintig keer rondgaan door de resonator, de golf niet verplaatst ten opzichte van de golf net na injectie. We kunnen de golf net na injectie en de golf na twintig keer rondgaan dan ook optellen zoals we dat gedaan hebben in figuur S.2a. Het licht zal zichzelf dus versterken en constructief interfereren.

Nu bekijken we het licht dat een golflengte heeft dat net een beetje te lang is om te passen in de resonator. Dit is getekend in figuur S.4b. We zien dat hoe langer het licht rondloopt des te meer de golf verschuift ten opzichte van de golf vlak na injectie (de golf net na injectie is gestippeld). Na vijf rondgangen is de golf een klein beetje verschoven ten opzichte van de golf vlak na injectie. Het licht is echter zo weinig verschoven dat het nog



**Figuur S.4:** Het kleurscheidend vermogen van een resonator is gebaseerd op het aantal keren dat het licht rondloopt tussen de spiegels. In figuur a (linker kolom) bekijken we licht dat precies past in de resonator. Ongeacht het aantal rondgangen blijft de golf op de dezelfde plek terugkomen, zodat het licht altijd constructief interfereert met zichzelf. In figuur b (rechter kolom) bekijken we licht met een golflengte die net niet past in de resonator. Na vijf rondgangen is het licht een klein beetje verschoven (doorgetrokken lijn) in vergelijking met het licht net na injectie (gestippelde lijn). Het licht zal echter nog steeds constructief interfereren. Na twintig rondgangen is het licht echter wel zoveel verschoven (doorgetrokken lijn) dat het destructief interfereert met zichzelf. Het licht zal uitdoven.

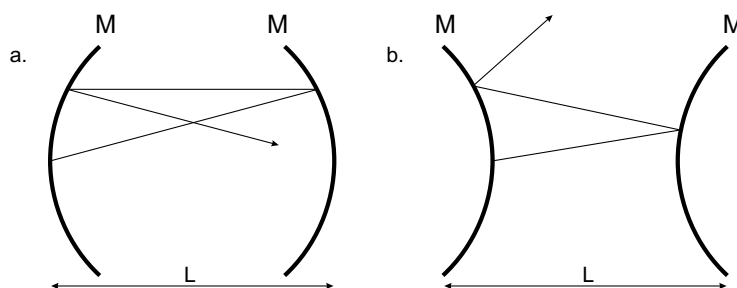
## Samenvatting

steeds behoorlijk goed constructief interfereert. Na twintig rondgangen is het licht echter wel zo veel verschoven dat de pieken van de golf samenvallen met de dalen van de golf vlak na injectie. Deze situatie is ook weergegeven in figuur S.2b. De twee golven zullen elkaar dus uitdoven oftewel destructieve interferentie treedt op.

We hebben nu gezien dat licht dat precies past, constructief met zichzelf interfereert ongeacht het aantal rondgangen. Licht dat echter net niet past, interfereert een aantal rondgangen nog constructief, maar naarmate het aantal rondgangen toeneemt interfereert het destructief. Hiermee hebben we laten zien dat het kleurscheidend vermogen toeneemt met het aantal rondgangen. Het kleurscheidend vermogen wordt dus beter naarmate de reflectiviteit van de spiegels in de optische resonator toeneemt en het aantal rondgangen tussen de spiegels groter wordt. Dit is precies de reden dat het kleurscheidend vermogen van de resonator gebruikt in dit onderzoek veel beter is dan die van zeepsop of een olielaagje.

### S.3 Stabiele en instabiele resonatoren

Nu we weten hoe een resonator werkt gaan we ook kijken welke soorten resonatoren bestaan. Je kunt ze indelen in twee groepen; de stabiele en de instabiele resonatoren. De stabiele resonator, afgebeeld in figuur S.5a, bestaat uit twee *holle* spiegels. Een lichtstraal die naar buiten loopt wordt door de vorm van de spiegel terug naar het midden geduwd. De instabiele resonator, afgebeeld in figuur S.5b, bestaat uit twee *bolle* spiegels. Een lichtstraal die naar buiten loopt wordt door de vorm van de spiegels alleen maar verder naar buiten geduwd. Lichtstralen in een instabiele resonator zullen de spiegels maar een paar keer raken voordat ze uit de resonator verdwijnen. Een instabiele resonator wordt dan ook gekenmerkt door zijn hoge verliezen. We zullen verderop in dit hoofdstuk dieper ingaan op de toepassing van de stabiele en instabiele resonator in dit onderzoek.

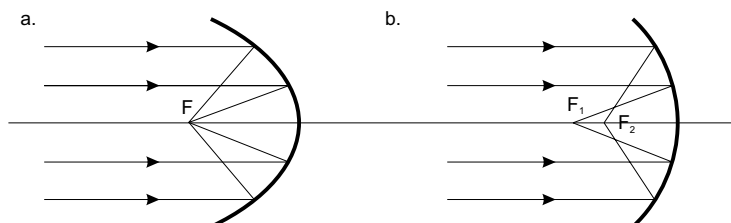


**Figuur S.5:** Twee typen resonatoren: In figuur a zien we de stabiele resonator bestaande uit twee holle spiegels. Licht dat naar buiten loopt wordt door de vorm van de spiegels naar binnen geduwd. In figuur b zien we de instabiele resonator bestaande uit twee bolle spiegels. Licht dat naar buiten loopt zal alleen maar verder naar buiten worden geduwd. Dit type resonator vertoont dan ook veel verliezen.

## S.4 Spiegel imperfecties

Tot nu toe zijn we uitgegaan van ideale spiegels. Dit is in werkelijkheid niet het geval. Spiegels vertonen imperfecties op verschillende lengteschalen. De eerste soort imperfectie die we hier bespreken is ‘oppervlakte ruwheid’. Dit zijn kleine hobbeltjes en putjes aan het oppervlak van de spiegel, die ontstaan tijdens het maken. De diameter van deze hobbeltjes en putjes is voor een gemiddelde spiegel 1 – 10 micrometer en de hoogte is ca. 0.005 micrometer. Ook al is dit hoogteverschil zeer klein, het is toch een honderdste deel van een optische golflengte. Dit betekent dat op de positie van zo’n hobbeltje de resonator een heel klein beetje korter is. Als het licht vaak genoeg rondgaat, interfereert het licht niet meer constructief. Dit betekent dat het kleurscheidend vermogen van de resonator vermindert. Verder wordt het licht een beetje verstrooid als het een bolletje of een putje raakt. Dit veroorzaakt extra verliezen, die het kleurscheidend vermogen eveneens verslechteren.

De tweede soort imperfecties zijn de zogeheten ‘aberraties’. Dit zijn afwijkingen van de ideale ruwe vorm van een spiegel. Een spiegel met een ideale vorm laat alle lichtstralen door één punt gaan, zoals te zien in figuur S.6a. Dit betekent dat een voorwerp scherp wordt afgebeeld. Afwijkingen van de ideale vorm van een spiegel zorgen ervoor dat lichtstralen die verder naar buiten toe op de spiegel vallen op een andere positie worden afgebeeld dan lichtstralen die meer naar binnen op de spiegel vallen. Dit is weergegeven in figuur S.6b. Het niet samenvallen van deze lichtstralen veroorzaakt bij afbeelding onscherpte. Afwijkingen van de ideale vorm ontstaan doordat een spiegel in het productieproces een sferische vorm krijgt, dus de vorm van een deel van een bol. Deze vorm wordt echter toch vaak gebruikt omdat die makkelijk te vervaardigen is.



**Figuur S.6:** Demonstratie van het begrip aberratie. De spiegel in figuur a heeft een ideale vorm. Deze vorm heet ook wel ‘parabolisch’. De parabolische spiegel zorgt ervoor dat de verschillende evenwijdige lichtstralen netjes in het punt  $F$  samenkomen. Dit betekent dat een voorwerp (buiten de tekening) scherp wordt afgebeeld. In figuur b zien we een spiegel zoals die ook gebruikt wordt in optische resonatoren. De vorm van zo’n spiegel heet ook wel ‘sferisch’. Lichtstralen die de spiegel meer aan de buitenkant raken, komen na reflectie dichterbij de spiegel bij elkaar (punt  $F_2$ ) dan lichtstralen die de spiegel meer in het midden raken. Deze komen samen in een punt verder van de spiegel (punt  $F_1$ ). Dit heeft tot gevolg dat als je iets afbeeldt met een sferisch spiegel het beeld een beetje uitgesmeerd wordt en daardoor onscherp is.



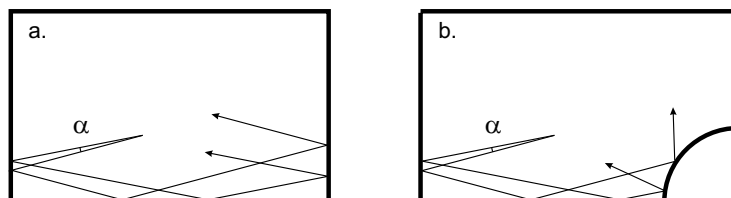
## S.5 Chaos

We hebben al een heleboel basiskennis, maar we moeten nog één ding weten voordat verklaard kan worden wat het initiële doel van deze promotie was, namelijk: “Wat is chaos?” Chaos associëren we vaak met een toestand van ongeordendheid, wanorde of zelfs orde-loosheid. In de Natuurkunde is dit maar ten dele waar en spreken we liever over deterministische chaos. Om dit begrip duidelijk te maken gaan we biljarten. Ons biljart lijkt op een café-biljart. Het enige verschil is dat de bal veel vaker rond moeten kunnen gaan dan in een café-biljart mogelijk is. We nemen daarom een laken waarop de ballen nauwelijks afremmen.

We beginnen ons experiment met een rechthoekige biljarttafel. Zo'n biljart is een voorbeeld van een niet-chaotisch systeem. Het spel dat we spelen gaat als volgt: We stoten een bal af in een bepaalde richting en houden bij hoe de bal over het biljart rolt. Als de eerste bal is uitgerold, stoten we een tweede bal vanaf dezelfde startpositie, onder een net iets andere hoek. Wederom houden we bij hoe de bal over de tafel loopt.

We herhalen deze stoot-experimenten met een ander (aangepast) biljart, waarbij we een cirkelvormig stuk uit de hoek van eenzelfde rechthoekig biljart hebben gezaagd. De vorm van dit aangepaste biljart is wel chaotisch en is te zien in figuur S.7b. Vervolgens vergelijken we de resultaten in het niet-chaotische en het chaotische biljart. Het verschil tussen de twee afgelegde paden in het niet-chaotische biljart ontwikkelt zich maar langzaam. Na drie keer de band raken is het verschil in paden nog erg beperkt, zoals te zien is een figuur S.7a. Als we nu kijken naar het verschil van de paden in het chaotische biljart zien we dat de twee ballen, zodra ze het bolle stuk hebben geraakt, een heel andere kant opgaan. Het kleine verschil bij het aanstoten heeft al zeer drastische gevolgen na drie ketsen.

Deze gevoeligheid voor de begincondities is hét kenmerk van chaotische systemen. Identieke begincondities leveren weliswaar precies hetzelfde eindresultaat op, maar een kleine afwijking aan het begin levert een totaal ander resultaat op.



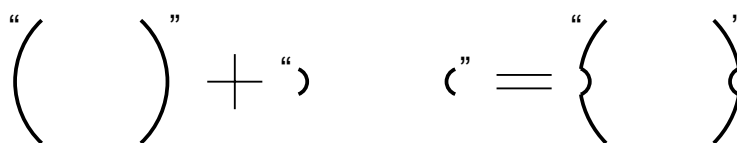
**Figuur S.7:** Demonstratie van het verschil tussen een niet-chaotisch (figuur a) en een chaotisch biljart (figuur b). In het biljart zijn twee paden afgebeeld van biljartballen die met een klein verschil in hoek (hoek  $\alpha$ ) zijn afgestoten. Na een aantal keer de band geraakt te hebben, zijn de twee paden in het niet-chaotische biljart nog bijna hetzelfde. In het chaotische biljart daarentegen is dit niet het geval. De twee paden van de twee gespeelde ballen gaan een heel andere kant op nadat het bolle stuk is geraakt. Het kleine verschil bij het aanstoten in een chaotisch biljart heeft dus grote gevolgen voor het verdere verloop van de ballen.

Om chaos experimenteel te kunnen laten zien, moet je aan twee voorwaarden voldoen. Ten eerste heb je een systeem nodig dat exponentieel gevoelig is, oftewel een systeem waarin een kleine verandering aan het begin sterk toeneemt. En ten tweede heeft chaos tijd nodig

om zich te kunnen ontwikkelen en moet de verblijftijd in het systeem voldoende zijn.

## S.6 Dit proefschrift

We gaan terug naar onze optische resonator en denken weer even aan de twee hoofdgroepen van resonatoren; de stabiele en de instabiele resonator. De instabiele resonator zorgt ervoor dat twee lichtstralen die op bijna dezelfde positie invallen op de spiegel een heel andere kant op gaan. Een instabiele resonator is dus zeer gevoelig voor een kleine verandering aan het begin. Nadeel is echter dat het licht maar heel kort opgeslagen blijft. Dit is niet het geval in een stabiele resonator, waarin het licht heel lang opgeslagen kan blijven. Een combinatie van een instabiele en een stabiele resonator lijkt dus een systeem op te leveren dat aan beide voorwaarden voor chaos voldoet. Zo'n systeem is weergegeven in figuur S.8.



**Figuur S.8:** Schematische weergave van een chaotische resonator opgebouwd uit een stabiele resonator aan de buitenkant en een instabiele resonator in het midden. Het instabiele deel zorgt voor de exponentiële gevoeligheid voor de begincondities en de stabiele buitenkant zorgt ervoor dat chaos voldoende tijd krijgt om zich te ontwikkelen.

Het uitgangspunt van deze promotie was dan ook het systeem dat bestaat uit een combinatie van beide resonatoren. De benodigde spiegels hebben echter een vorm die niet makkelijk te maken is. Het heeft dan ook lang geduurd om het juiste materiaal en de juiste productiemethode te vinden, die niet enkel de juiste vorm van de spiegel opleverde, maar ook een voldoende lage oppervlakte-ruwheid had.

De combinatie van een stabiele en een instabiele resonator is niet veel bestudeerd. Als je gaat meten, kunnen er ten gevolge van spiegel imperfecties dus allerlei effecten optreden die niets met chaos te maken hebben. We hebben er dan ook voor gekozen eerst het gedrag van imperfecties in een stabiele resonator te bestuderen.

Het effect van ruwheid en aberraties op de resonanties van een optische resonator is bestudeerd in de hoofdstukken 2-6. In deze hoofdstukken is ook gemeten hoe lang het licht opgeslagen blijft in de resonator. Dit is vergeleken met het ideale geval, waarbij enkel de reflectiviteit van de spiegels wordt meegenomen en de imperfecties van de spiegels worden verwaarloosd. De gemeten verblijftijd van het licht in de experimentele resonator is natuurlijk korter dan in het ideale geval. Het verschil in de gemeten en de ideale tijd is een goede maat om de imperfecties te kunnen karakteriseren.

Tijdens het doen van de metingen, zoals beschreven in de eerste vier hoofdstukken, zijn we bezig geweest om, samen met een aantal bedrijven, de speciale hoogreflecterende spiegels te maken uit figuur S.8. Dit bleek lastiger dan gedacht en het lukte eigenlijk pas een jaar geleden. Het onderzoek dat gedaan is aan resonatoren met deze speciale spiegels is beschreven in de hoofdstukken 7-9. Chaos hebben we niet direct kunnen aantonen, maar wel een boel spannende fysica.

Samenvatting