

Manon Kok

Causale verklaringen in kwantummechanische experimenten

Afstudeerverslag voor de opleiding
Wijsbegeerte van Wetenschap, Technologie en Samenleving
Faculteit Gedragwetenschappen
Universiteit Twente

juni 2007

Causale verklaringen in kwantummechanische experimenten

Manon Kok

Afstudeerscriptie
ter afsluiting van de opleiding
Wijsbegeerte van Wetenschap, Technologie en Samenleving
bij de leerstoelgroep
Cultuurfilosofie van de Techniek
aan de
Universiteit Twente

Examenzitting: 29 juni 2007, 15.15 uur
Colloquium: 29 juni 2007, 16.45 uur
De commissie heeft bestaan uit:

dr.ir. Mieke BOON (1e begeleider)
dr. Pieter VERMAAS (2e begeleider)
dr. Stuart GLUCK (3e begeleider)
dr.ir. Alexander BRINKMAN (technisch begeleider)

Voorwoord

Op het moment dat ik dit schrijf is het dan eindelijk zo ver: ik ga m'n scriptie definitief inleveren. Wel spannend om iets af te ronden waar je zo lang aan hebt gewerkt.. Ik hoop dat ik niet opeens volgende week allemaal spelfouten vind of dingen die ik beter iets anders had kunnen formuleren..

Inmiddels is het al een hele tijd geleden ben ik begonnen met m'n afstuderen. Ik heb m'n afstudeeronderwerp altijd ontzettend leuk en interessant gevonden en heb ook altijd met veel enthousiasme eraan gewerkt. Maar vooral het daadwerkelijke schrijven van m'n scriptie is ook gepaard gegaan met een hoop frustraties. Toch denk ik dat die frustraties er nu eenmaal bij horen en dat ze noodzakelijk waren in het leerproces. Uiteindelijk kan ik zeggen dat het zeker een heel leuke en leerzame tijd is geweest.

Ik wil even van de gelegenheid gebruik maken om wat mensen te bedanken. Ten eerste natuurlijk m'n begeleiders: Mieke, Alexander, Pieter en Stuart. Mieke, bedankt dat je me altijd weer moed in kon praten als ik het niet meer zag zitten en er altijd voor kon zorgen dat ik na een gesprek weer met nieuw enthousiasme verder kon werken. Stuart, thanks for helping me reviewing my introduction and summary/conclusions. I hope I didn't drive you too crazy with my bad English writing and my problems with accurately describing the Received View. Alexander, ik vond het heel leuk dat je iedere keer als ik langs kwam zo enthousiast was en meedacht met alles waar ik mee bezig was. Pieter, heel erg bedankt dat je helemaal naar Enschede komt voor m'n examenzitting en colloquium!

Verder wil ik Mike bedanken voor de steun in de afgelopen tijd en het vertrouwen dat ik m'n scriptie toch ooit wel eens zou gaan afronden. Sorry dat ik je zo gefrustreerd heb omdat ik altijd alleen maar bezig was met eeuwig stukken herschrijven! Ook wil ik Peter Mulder bedanken. Peter, zonder jou was ik waarschijnlijk nooit begonnen met WWTS.. Verder heel erg bedankt voor het doorlezen van m'n ontzettend lange scriptie! Tot slot wil ik m'n ouders, Rianne en al m'n huisgenoten bedanken voor alle steun en interesse.

Aan alle mensen die daadwerkelijk de moeite gaan doen om m'n scriptie te lezen: heel veel leesplezier!

Inhoudsopgave

Voorwoord	v
Introduction	1
I Wetenschapsfilosofisch en fysisch kader	11
1 Natuurwetenschappelijke verklaringen	13
1.1 Causale verklaringen	13
1.1.1 David Hume	14
1.1.2 Twee wetenschapsfilosofische tradities	17
1.2 Verklaringen in termen van algemene wetten: het logisch positivismisme	17
1.3 Een compromis: Wesley Salmon	20
1.4 Modellen in wetenschappelijke verklaringen	21
1.5 Drie soorten kennis	24
2 Verschillende soorten kennis in natuurwetenschappelijke experimenten	25
2.1 De aard van de kennis	25
2.1.1 Theoretische kennis	25
2.1.2 Empirische kennis	28
2.1.3 Modellen	30
2.2 Het toepassingsgebied van de kennis	31
2.2.1 Het apparaat-wereldcomplex	31
2.2.2 Nomologische machines	33
2.2.3 Kennis die toepasbaar is op de wereld	34
3 Kwantummechanica: theorie en experiment	39
3.1 Youngs experiment - ontwikkeling van de kwantummechanica . . .	39
3.1.1 Licht: deeltje of golf?	39
3.1.2 Uitbreidingen van Youngs experiment: waarschijnlijkheid, superpositie en metingen	41
3.2 Kwantummechanische theorie	42
3.3 Entanglement: causaliteit en lokaliteit	43
3.3.1 Causaliteit en lokaliteit	44
3.4 Interpretaties van de kwantummechanica	45
3.4.1 Grondprincipe	45

3.4.2	Verschillende interpretaties	46
3.5	Testen van de kwantummechanica: Bells theorema	48
3.6	Testen van Bell-ongelijkheden met fotonen	49
3.7	Testen van Bell-ongelijkheden met elektronen	49
3.7.1	Supergeleiding	50
3.7.2	Globale opzet experiment	51
3.7.3	Eerder onderzoek	56
3.7.4	Verschillende mogelijke opstellingen	57
3.7.5	Testen van Bell-ongelijkheden	62
3.8	Conclusie	62
4	Modellen in het experimentele onderzoek naar entanglement	65
4.1	Mechanistische modellen	66
4.1.1	Elektronen, Cooperparen en hun capaciteiten	66
4.1.2	Entanglement en causaliteit	67
4.2	Nomo-mathematische modellen	67
4.3	Diagrammatische modellen	70
4.4	Experimentele modellen	72
4.5	Conclusie	73
II	Testen in hoeverre causaal redeneren elimineerbaar is in het opzetten van kwantummechanische experimenten	75
5	Is causaal redeneren elimineerbaar?: Een wiskundige benadering	79
5.1	De Schrödingervergelijking	80
5.1.1	De tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking	81
5.2	Superpositie	82
5.2.1	Wiskundig	82
5.2.2	Fysisch	83
5.3	Entanglement	84
5.3.1	Twee deeltjes in een potentiaalput zonder interactie	85
5.3.2	Twee deeltjes in een potentiaalput met interactie	86
5.3.3	Spin-entanglement	88
5.4	Wetenschapsfilosofische reflectie	89
5.4.1	Het toekennen van fysische betekenis aan de verschillende variabelen	89
5.4.2	Het toepassen op een specifieke situatie: de potentiaalterm	90
5.4.3	Het overgaan naar een andere wiskundige notatie: de Dirac-notatie	92
5.5	Conclusie	93
6	Is causaal redeneren elimineerbaar?: Een experimentele benadering	95
6.1	Twee verschillende soorten van onderzoek doen	95
6.2	Het apparaat-wereldcomplex	96
6.2.1	Bohrse apparaten	96
6.2.2	Drie verschillende noties van een Bohrs apparaat	97

6.3	Drie testmethodes	98
6.3.1	Welke modellen worden er gebruikt?	99
6.3.2	Vermijden van circulariteit	100
6.4	Hebben we in het onderzoek naar entanglement te maken met een Bohrs experiment?	101
6.4.1	Een eerste test: Welke modellen worden gebruikt?	101
6.4.2	Een tweede test: Kan circulariteit vermeden worden?	101
6.4.3	Een derde test: Natuurkundige en filosofische reflectie	103
6.5	Vruchtbare experimenten?	111
6.6	Conclusie	113
III	Summary and Conclusions	115
7	Summary and Conclusions	117
7.1	Background to my thesis	117
7.2	Philosophical framework	119
7.2.1	Eliminating causal connections from science	119
7.2.2	Experiments as interventions	121
7.2.3	Theory and models	121
7.2.4	The philosophical problem of causation	123
7.3	Analysis of the results of my thesis	124
7.3.1	Introduction	124
7.3.2	The HD-model	125
7.3.3	The design of the experiment: ontologically separating instrument and entity	126
7.3.4	Obtaining experimental hypotheses	127
	Bibliografie	131

Introduction

This masters thesis aims at giving an account of causal explanations in quantum mechanical experiments. Causation as well as quantum mechanics have been widely discussed in philosophy. However, I will not address the main debates in this area. Instead, I will take into account the scientific practice itself. In this introduction, I will briefly introduce the background of my thesis by addressing the problems of causation and of explanations in science, and the special complications quantum mechanics introduces for these. Thereafter, I will discuss the main question and structure of my thesis.

In 2005, I did my bachelors research on quantum entanglement. In this research, I designed an experiment to test Bell's inequalities for electrons, making use of superconductors to obtain entangled pairs of electrons. If Bell's inequalities are violated in the experiment, entanglement should be considered to be an intrinsic property of electrons. If Bell's inequalities are not violated, the quantum mechanical description of the microworld cannot be considered to be complete.

During my bachelors research and in earlier parts of my studies, I encountered some interesting questions concerning quantum mechanical experiments. I explored these questions in numerous discussions with my supervisor Alexander Brinkman. These questions led me to the subject of my master thesis: causal explanations in quantum mechanical experiments.

When studying the physics literature on quantum mechanics, there seems to be a great difference between theoretical approaches on the one hand and experimental approaches on the other. One of the most important differences lies in the role ascribed to causation in these two different types of research. A philosopher who provides us with a clear view on the notion of causation is David Hume. Hume was an 18th century British empiricist who gave an influential explication of causation.

According to Hume, a causal relation is a relation of regularity between two phenomena: a cause and an effect. There has to be a constant conjunction between the cause and the effect and the cause *always* has to precede the effect. Furthermore, there has to be proximity in space and time between the cause and the effect. In modern science, the requirement of proximity in space and time is made more precise by the physical requirement of locality. Albert Einstein showed that particles cannot travel with a velocity greater than that of light, which is a finite quantity. Since information has to be transmitted by some kind of mediator, which thus travels with a finite velocity smaller than or equal to that of light, it takes some time to transfer information from one place to another. Therefore, a cause cannot *instantaneously* bring about an effect at

some spatial distance. In the microworld, this requirement of locality seems to be violated.

In experimental approaches to quantum mechanics, causal reasoning plays an important role. Performing quantum mechanical experiments, we at least have to understand what happens in the experiment to be able to design the instruments and the experiment, and to interpret its experimental results. Understanding usually implies causal characterizations of the instrument and of the experiments performed with it.

While causal reasoning thus seems to play an important role in experimentation, causation itself is a problematic notion in quantum mechanics as well as in philosophy of science. In quantum mechanics, the notion of causation is problematic because not all of the requirements for causal relations seem to be fulfilled. For example, in phenomena like entanglement systems are predicted to act non-causally: systems which are separated in space are predicted to react *instantaneously* to each other. Thus, the requirement of locality seems to be violated.

In order to avoid problems in interpreting quantum mechanics, a growing number of theoretical physicists have claimed that we shouldn't use causal reasoning in quantum mechanics. Instead, we should stick to mathematics and reason in terms of universal laws: we shouldn't ask ourselves *why* a system behaves the way it does; we should only address the phenomenal question of *how* it behaves.

Thus, in many theoretical approaches to quantum mechanics, causal reasoning is abandoned by physicists. Because the notion of causation *is* important in reasoning about experiments, there appears to be a severe difference between the roles ascribed to causation by experimental versus theoretical approaches to quantum mechanics.

This problem is based on issues physics encounters concerning causation. But there is also a philosophical problem of causation which was raised by Hume. Hume defended a strict empiricism, and therefore presupposed that all our knowledge has to be acquired through experience. Based on this presupposition, Hume concludes that all our *ideas* have to be based on *impressions*. Ideas can be seen as knowledge of the world; impressions are observations of the world.

However, according to Hume, not all knowledge can be directly observed through the senses. In particular, the relations between things cannot be observed. We can see that B happens after A, but we cannot see that A "causes" B, i.e. that there is a necessary connection between A and B. Therefore, Hume concludes that we can also combine ideas in our imagination to form new ideas. This combination can be logically entailed by the relationships between ideas. However, if this is not the case, like with causal relations, these new ideas can only be a construct of our imagination. Thus, Hume concluded that causation has to be considered to be a metaphysical notion, that is, something that we presuppose about the world, but cannot possibly observe.

Philosophy of science has generally accepted that Hume's worries about the notion of causation at least have to be addressed. Since causal reasoning plays an important role in everyday reasoning, Hume's conclusion that causation has

to be considered to be a metaphysical notion seems to be problematic. It is especially worrisome when it is used in scientific reasoning because science aims at obtaining objective knowledge of the world. This is why in the 20th century, a new school in philosophy of science emerged. Many practitioners called themselves logical empiricists or logical positivists. In general, this school is often called the Received View. The Received View argued that scientific reasoning can be reconstructed such that primitive causal connections can be eliminated. According to the Received View, causal laws, and scientific laws in general, could be seen as universal regularities. Over time, the Received View has undergone many developments. Because of this, there exists a broad spectrum of views within the Received View (Suppe, 1974). I will focus on the philosophers of the Received View who have most strongly been influenced by Hume. They have argued that there is only a psychological need to understand such laws as causal, not a scientific necessity.

Thus, there seems to be a tension between the idea that we shouldn't reason causally in quantum mechanics on the one hand and the idea that we need some kind of causal understanding to design and interpret quantum mechanical experiments on the other. In this masters thesis, I will investigate this issue further. The specific aim of my thesis is to investigate reasoning in actual scientific practice and to understand what role causal reasoning plays in designing instruments and experiments and in interpreting the experimental results.

A possible way to interpret causation is in terms of entities with capacities. The notion of capacities is introduced by Nancy Cartwright. She defines capacities as "abilities, tendencies and propensities to do" (Cartwright, 1999, p. 64). Thus, capacities can be seen as the collection of properties an entity *could* have, were it in the appropriate situation, i.e. its dispositional properties. Interpreting causal reasoning as reasoning in terms of entities with capacities, the main question of my thesis will be:

Is causal reasoning (i.e. reasoning in terms of entities with capacities) eliminable in designing and interpreting quantum mechanical experiments?

To my knowledge, there is not much of a philosophical literature which focusses on the scientific practice of quantum mechanical experiments itself. The usual focus is on the metaphysics and epistemology of science, neglecting how the experiments and instruments have been designed in actual scientific practice. This is also the case for the measurement problem, which has been widely discussed in the literature. The measurement problem arises because at first glance there seem to be two mechanisms at work in the temporal evolution of a quantum mechanical system. When no measurements are performed, the dynamics of the quantum system can be mathematically described by Schrödinger's equation. This equation describes the temporal evolution of the wave function, which is the mathematical description of the state of the system. It is generally accepted that the square of the wave function can be seen as the expectation value for the particle to have a particular value upon measurement of an observable. Thus, this square gives a probability distribution.

Given that Schrödinger's equation is the equation of motion in quantum mechanics, i.e. that it describes the temporal evolution of a quantum mechanical system, the following assumptions are natural to make:

1. that Schrödinger's equation is universally valid, i.e. that, without exception, it governs the dynamical evolution of every physical system in the universe
2. that experimenters are not deluded, i.e. that what they take to be the case at the conclusion of their measurements is in fact the case (Clifton, 1996)¹
3. that a system has a value for an observable if and only if it is in the corresponding eigenstate²

However, making these assumptions leads us to a contradiction when we attempt to jointly apply them to measurements of quantum mechanical systems. Schrödinger's equation predicts that the state of a system will generally evolve into a superposition of all possible eigenstates (this is typically described by saying that wave functions tend to spread). So the first assumption leads us to think that systems are in superpositions at the end of measurement interactions. But at the conclusion of an experiment we always find a determinate value for the observable. Our second and third assumptions tell us that, since we got a definite value and the experimenter is not deluded, the system must be in the eigenstate associated with that eigenvalue. Hence we have a contradiction: our three assumptions cannot all hold in quantum mechanics.

A famous thought experiment illustrating this problem is described by Erwin Schrödinger. It involves a cat in a steel chamber:

A cat is penned up in a steel chamber, along with the following device (which must be secured against direct interference by the cat): in a Geiger counter there is a tiny bit of radioactive substance, so small, that perhaps in the course of the hour one of the atoms decays, but also, with equal probability, perhaps none; if it happens, the counter tube discharges and through a relay releases a hammer which shatters a small flask of hydrocyanic acid. If one has left this entire system to itself for an hour, one would say that the cat still lives if meanwhile no atom has decayed. The psi-function of the entire system would express this by having in it the living and dead cat (pardon the expression) mixed or smeared out in equal parts. (Schrödinger, 1980)

Thus, while in the chamber, Schrödinger's equation describes the state of the cat as a superposition of alive and dead eigenstates. But opening the box, we never observe a superposed cat; we observe a cat which is either alive or dead.

Hence, we have to give up at least one of our three assumptions. Ortho-

¹This claim is not meant to rule out the possibility of experimental error. It is simply meant to suggest that experimental results can be taken seriously.

²A detailed description of what is considered to be an eigenstate can be found in (Besançon, 1990).

dox interpretations of quantum mechanics reject the first assumption.³ They conclude that measurements influence the state of the system. Before measurement, the cat was in a superposed state of which the dynamical behaviour is governed by Schrödinger's equation. Upon measurement, a so-called "collapse of the wave function" occurs which violates Schrödinger's equation. When and why systems behave in this seemingly inconsistent way when measured is known as the measurement problem. A solution to the measurement problem would tell us why and under what conditions this collapse of the wave function occurs.

The question that I'm addressing in this thesis does not focus on the measurement problem. Rather, I focus primarily on the actual scientific practice, particularly on scientific reasoning about the design and interpretation of experiments. Therefore, I take it that reviewing discussions on the measurement problem will not be very useful in finding an answer to my main question. Instead, I will rely on the literature on instruments and experiments in science. Instruments and experiments, however, have not been widely discussed in philosophy of science. A reason for this can be found in certain presuppositions of the Received View, which was the dominant view in philosophy of science during most of the 20th century and therefore has had a large influence on the philosophical literature. This Received View encounters some serious problems in considering experiments and instruments.

The Received View focuses on a rational reconstruction of science. According to this view, in reconstructing science we abstract the justification of a scientific theory from the discovery of the theory. One of the main goals of the Received View is to give a reconstruction of scientific reasoning in such a way that we don't have to rely anymore on the primitive notion of causation. To achieve this goal, philosophers of the Received View explicated the notion of causation.

The Received View distinguishes between two different types of knowledge that can play a role in science: theory and observation. According to the Received View, a scientific theory consists of a set of statements in a first-order logic, using both observational and theoretical terms. So-called correspondence rules play an important role in this. As is described by Frederick Suppe, these correspondence rules serve three functions:

1. They define theoretical terms
2. They guarantee the cognitive significance of theoretical terms
3. They specify the admissible experimental procedures for applying a theory to phenomena (Suppe, 1974, p. 17)

³Modal interpretations reject the third assumption instead. Arguably, there is no measurement problem for modal interpretations, since there is no non-unitary temporal evolution, i.e. no collapse of the wave function. Instead the challenge is to specify the relationship between states and properties. Typically, modal interpretations are motivated, at least in part, by the desire to allow for causal reasoning, unlike in orthodox collapse interpretations. Hence, arguing for the necessity of causal reasoning in the context of modal interpretations is sort of like preaching to the choir. Rather, I argue that, even if one is otherwise inclined towards an orthodox collapse interpretation, actual scientific practice, particularly reasoning about the design and interpretation of experiments, shows causal reasoning to be necessary in quantum mechanics (in order to effectively build experimental models to yield experimental hypotheses).

Thus, correspondence rules can be used to bridge the gap between observations and theoretical laws.

A philosopher who studied the scientific method of testing hypotheses is Carl Gustav Hempel. Hempel argued that the reconstruction of the scientific testing of hypotheses can be understood in terms of the Hypothetico-Deductive (HD) method. The HD-method assumes that in science, we can deductively obtain predicted experimental consequences from hypotheses. If observations correspond to the experimental predictions, they increase the extent to which the theory is confirmed.

One of the problems the philosophers of the Received View encountered is that of the interpretation of theoretical entities. In 20th century science, theoretical entities have come to play an important role. Theoretical entities are postulated by theories, but we never directly observe these entities. Therefore, the scientific use of theoretical entities gives rise to philosophical questions of what this postulation entails.

The Received View attempted to solve this problem by considering correspondence rules to be part of the theory. Theoretical entities are coupled to observations by these correspondence rules. Because the correspondence rules are part of the theory, the theoretical terms are provided with empirical meaning and thus become meaningful. In this way, the theoretical entities can be seen as purely instrumental and metaphysics can be avoided. However, because of this, the theoretical entities become intertwined with the correspondence rules, so that the only way to meaningfully talk about a theoretical entity is to refer to observations using instruments.

This idea can also be seen in the view of Niels Bohr: according to him it is no longer possible to clearly distinguish between theoretical entities and instruments in modern scientific experiments (Faye, 2002). Bohr argued that in classical physics, physicists assume that an object in the physical world has properties in-itself, i.e. as inherent properties, independent of their actual observation. However, when performing experiments in modern physics, it is no longer possible to make a clear distinction between entity and instrument according to Bohr. Thus, we don't know what we intervene with: the entity, the instrument, or both. Therefore, Bohr claims that it is only possible to obtain knowledge about an entity in combination with an experimental set-up in experiments in modern science. According to Bohr, it is now no longer possible to speak in terms of entities with properties in-themselves.

The HD-model is meant as a philosophical reconstruction of how hypotheses are tested in experiments. However, when trying to understand the use of instruments and experiments in scientific practice, this model seems to have major shortcomings. As I described before, correspondence rules give empirical meaning to theoretical entities in terms of purely observational terms. In experiments, we do not directly observe the outside world, but observe it through an instrument. Therefore, the correspondence rules have to refer to instruments (Suppe, 1974). This way, the entity is considered to be purely instrumental and is defined through the instruments. This brings up the problem that it no longer seems possible to think about the theoretical entity without reference to the instrument.

The Received View aims at a philosophical reconstruction of the results of

science, in particular of how theories and laws are justified. It abstracts from how these results are produced in scientific practice. Therefore, the problems the philosophers of the Received View seem to encounter when considering instruments and experiments are irrelevant for them. They have mostly taken an instrumental approach towards experiments; experiments can be used to test theory, but the theory is the subject of interest. As a result, the roles of experiments and of instruments have not been widely discussed in this tradition.

In the Received View, theoretical entities become intertwined in this way with the correspondence rules, such that the only way to meaningfully talk about a theoretical entity is to refer to observations from instruments. A philosopher who comes from a different philosophical tradition but shares this view on experiments concerning theoretical entities is Rom Harré (Harré, 2003). In accord with Bohr's view, Harré argues that experiments in modern science are so complex that it is no longer possible to ontologically separate instrument and entity. Hence, it is now no longer possible to know exactly what we intervene with; scientific instruments are considered to be black boxes. Because we cannot have any knowledge of what happens inside the black box, it is not possible to have knowledge of why an experiment gives a certain experimental result. Therefore, it is not possible to predict if another experimental set-up will give the same result. Because of this, Harré concludes that knowledge we obtain from these experiments can only be valid in an apparatus-world complex.

Ian Hacking took a new approach towards scientific experiments. In his book *Representing and Intervening* (Hacking, 1983), he addresses the debate about scientific realism, i.e. whether or when a theoretical entity can be considered to be real. According to Hacking, scientific experiments can be seen as interactions with the world. He argues that being able to manipulate theoretical entities indicates that the entity exists. For example, he studies the case of electrons. In this, he discusses how it is possible to alter the charge on a niobium ball. To accomplish this, physicists spray it with positrons to increase the charge or with electrons to decrease the charge. Based on this example, Hacking comes to his famous conclusion : "So far as I'm concerned, if you can spray them then they are real" (Hacking, 1983, p. 23). As can be seen from the title of his book, Hacking emphasizes the importance of intervention, whereas in most philosophy of science the focus has been on representation. Taking this approach, he doesn't need the HD-model described above. Instead, he focuses on knowledge we can obtain if we can manipulate the world. Another philosopher who has put an emphasis on the role of scientific experiments is Nancy Cartwright. Like Hacking, Cartwright is a realist about entities. According to her, entities have certain capacities. It is through experiments that we can obtain knowledge about these capacities.

According to Cartwright, science has two main goals: First, it tries to find causal explanations of phenomena. Second, it tries to find mathematical explanations which describe the behaviour of these phenomena. In clarifying this view, Cartwright introduces two kinds of models. The first kind of model "presents a causal story." The second kind of model "fits the phenomenon into a theoretical framework." In the first kind of model, entities with capacities

play an important role: they present the causal story. Cartwright's hypothesis is that even in constructing mathematical explanations, knowledge of capacities plays an important role.

According to both Hacking and Cartwright philosophical understanding of science cannot abstract from causal reasoning about theoretical entities. Therefore, causal explanations play an important role for both of them.

In my thesis I will make use of both Harré's and Cartwright/Hacking's approaches for investigating and analysing the design of instruments and experiments, their use, and the interpretation of their results in actual scientific practice. If scientific experiments are performed as described by Rom Harré, scientific instruments should be considered to be black boxes and causal reasoning about entities is not available to us. If scientific experiments are performed as described by Cartwright and Hacking, causal reasoning is ineliminable in the design and interpretation of scientific experiments. According to their view, experiments can be seen as interventions, manipulations and interactions with the world.

The difference between these two approaches can best be illustrated by introducing two different epistemological models of our relation to the world: the screen model and the laboratory model of science. These two models of science were first introduced by Mieke Boon (Boon, 2006c). In the screen model, scientists are considered to be passive observers of the world. Loosely speaking, they observe phenomena as if on a screen. We can never observe causal relations in this way; we can only observe the constant conjunction of two phenomena. In the laboratory model of science, scientists are considered to actively intervene with the world. This way, we can observe the results of our interactions and learn about causal relations. Thus, in this model, causal reasoning plays an ineliminable role. Since knowledge about causal relations can now be obtained from interventions in the world, presupposing the laboratory model of science, the notion of causation is no longer philosophically problematic.

In this thesis I use a case study on experiments in quantum entanglement to analyse the scientific practice. In chapter 3, I present my case study and describe some basic ideas of quantum mechanics, the phenomenon of quantum entanglement, and the experiment which test Bell's inequalities which I have designed. In the first part of my thesis, I work out a philosophical framework in which I can analyse the problem and interpret its results. Therefore, I discuss contemporary philosophical issues in chapters 1, 2 and 4. In chapter 1, I first discuss the different kinds of explanations which can be conceptually distinguished in science. In chapter 2, I discuss the different kinds of knowledge which can be used in science. In chapter 4, I philosophically analyse the design of the experiment I describe in chapter 3. In this analysis I make use of four different types of philosophical models of the scientific practice. I study what role these four philosophical models play in the physical research testing Bell's inequalities for electrons.

In the second part of my thesis, chapters 5 and 6, I discuss the main research question itself. I use two different approaches to give an account of the role of causal explanations in quantum mechanical experiments. In chapter 5, I analyse theoretical approaches in quantum mechanics. More specifically, I analyse the mathematical derivation of entanglement and philosophically reflect on the

question of whether causal steps are made in the derivation. This approach is closely related to the view of Nancy Cartwright, in which she argues that, even in mathematical derivations, causal reasoning plays an important role.

In chapter 6 I discuss my main question by analysing experimental approaches in quantum mechanics, that is, how experiments and instruments are designed, and how experimental results are interpreted in scientific practice. In this chapter, I analyse whether physicists approach the experiment as a black box in which no ontological distinction can be made between instrument and theoretical (non-observable) entities, as Harré suggests, or whether they reason in terms of interactions between instruments and theoretical entities.

Deel I

**Wetenschapsfilosofisch en
fysisch kader**

Hoofdstuk 1

Natuurwetenschappelijke verklaringen

Een belangrijk doel van de natuurwetenschappen, is het vinden van natuurwetenschappelijke verklaringen van fenomenen. Als men een nieuw fenomeen waarneemt, vraagt men zich hierbij af hoe en waarom het fenomeen optreedt. Op deze manier is het mogelijk meer begrip te krijgen van de wereld om ons heen. Dit heeft niet alleen een wetenschappelijk, maar ook een technologisch doel: op het moment dat we meer informatie krijgen over hoe en waarom een fenomeen optreedt, kunnen we deze kennis aanwenden om het fenomeen te manipuleren.

Als we een nieuw fenomeen waarnemen, kunnen we onszelf verschillende vragen stellen. We kunnen ons bijvoorbeeld bezig houden met de vraag ‘hoe’ iets optreedt. Het is ook mogelijk ons af te vragen ‘waarom’ iets optreedt. Hierdoor zijn er verschillende soorten wetenschappelijke verklaringen.

In de wetenschapsfilosofie heeft men zich beziggehouden met het onderzoeken en beschrijven van wat voor soort wetenschappelijke verklaringen er in de natuurwetenschappen wordt gebruikt en wat de daarbij behorende wetenschapsfilosofische problemen zijn. Hieronder zal ik een kort historisch overzicht geven van wat er over dit onderwerp geschreven is. Dit kan fungeren als achtergrond van de ideeën in de hedendaagse wetenschapsfilosofie.

1.1 Causale verklaringen

Een vorm van verklaren die dicht bij onze alledaagse ervaring ligt is het verklaren op basis van causaliteit. Hierbij gaan we ervan uit dat een bepaalde gebeurtenis (de oorzaak) het optreden van een andere gebeurtenis (het gevolg) veroorzaakt. Dit is een manier van redeneren die we in alle facetten van ons dagelijks leven toepassen. We leren bijvoorbeeld als kind al dat als je een glas met hete thee aanraakt, het gevolg is dat je je vingers verbrandt; of dat als je een potlood over een vel papier haalt, het gevolg is dat er een streep op dit papier ontstaat. Dit soort causale verbanden spelen een belangrijke rol in ons dagelijks leven.

Causaal redeneren wordt ook in de wetenschap vaak toegepast. Als een fenomeen optreedt, wordt er vaak gezocht naar de oorzaak waarom dit fenomeen optreedt en wat voor gevolgen het optreden van het fenomeen heeft. In de wetenschap zien we dan ook dat regelmatig gezocht wordt naar causale verbanden.

Al in de 18^e eeuw hield de bekende Britse filosoof David Hume (1711-1776) zich bezig met de rol van causaliteit in natuurwetenschappelijke verklaringen. Hierbij kwam hij bepaalde problemen tegen die verbonden zijn aan het principe van causaliteit. Deze problemen zal ik hieronder bespreken.

1.1.1 David Hume

De filosofie van David Hume is sterk beïnvloed door empiricisten als John Locke en George Berkeley. In het empiricisme wordt een belangrijke rol toegedicht aan de ervaring. David Hume was van mening dat we al onze kennis opdoen uit zintuiglijke ervaring. Vanuit deze achtergrond heeft hij onderzoek gedaan naar natuurwetenschappelijke verklaringen. Hierbij stuitte hij op twee gerelateerde problemen: het probleem van inductie en het probleem van causaliteit.

Het probleem van inductie Het probleem van inductie dat wordt uitgewerkt door David Hume is verbonden met de vraag hoe we algemeen geldige kennis kunnen krijgen uit empirische waarneming. Het probleem van inductie is tweeledig (Wikipedia, 2006i). Ten eerste heeft het te maken met de situatie dat we altijd waarnemen dat een bepaald soort objecten bepaalde eigenschappen heeft. We kunnen ons dan afvragen wanneer het gerechtvaardigd is de conclusie te trekken dat alle objecten van deze soort deze eigenschappen hebben. Een voorbeeld hiervan is dat als alle zwanen die we ooit hebben gezien wit zijn, we aannemen dat alle zwanen deze kleur hebben. Ten tweede heeft het probleem van inductie te maken met de situatie dat we vooronderstellen dat bepaalde gebeurtenissen in de toekomst hetzelfde zullen gaan als in het verleden. Een voorbeeld hiervan is dat we aannemen dat de gravitatiewet van Newton morgen nog zal gelden. Een tweede voorbeeld is dat we aannemen dat de zon morgen ook weer op zal gaan.

David Hume heeft zich beziggehouden met dit probleem van inductie. Hij heeft uitgewerkt dat we nergens in onze ervaring een rechtvaardiging kunnen ontdekken waarom we inductieve gevolgtrekkingen maken. Er is altijd een kans dat we morgen een zwarte zwaan tegenkomen of dat de zon morgen niet opkomt.

Een paradox die het probleem van inductie duidelijk illustreert, is de ‘grue paradox’ (Achinstein, 2002). Deze is geïntroduceerd door Nelson Goodman in de jaren 1950 in zijn boek ‘Fact, Fiction, and Forecast’. Goodmans paradox begint met de volgende waarneming:

“All the emeralds so far examined are green,
therefore
All emeralds are always green”

Dit is een redenering die is gebaseerd op inductie. Toch lijken we geen twijfel te hebben over de juistheid van deze conclusie. Zelfs de Grote Van Dale stelt dat een smaragd een ‘grasgroene edelsteen’ is.

De paradox die Goodman heeft opgesteld, wijst ons er echter op dat het niet vanzelfsprekend is dat deze conclusie waar is. In de ‘grue paradox’ veronderstellen we dat we in een wereld leven waarin we niet de kleuren groen en blauw, maar de kleuren ‘grue’ en ‘bleen’ onderscheiden. Goodman definieert ‘grue’ en ‘bleen’ als volgt:

Definitie 1 “x is grue at time t if and only if t is prior to A.D. 2500¹ and x is green at t, or t is A.D. 2500 or later and x is blue at t.” (Achinstein, 2002, p. 307)

Definitie 2 “x is bleen at time t if and only if t is prior to A.D. 2500 and x is blue at t or t is A.D. 2500 or later and x is green at t.” (Achinstein, 2002, p. 311)

We zouden nu in deze wereld de volgende inductie redenatie toe kunnen passen:

“All the emeralds so far examined are grue,
therefore
All emeralds are always grue”

In deze wereld zouden we dus concluderen dat alle smaragden ‘grue’ zijn. In deze wereld hebben we evenveel reden om aan te nemen dat alle smaragden altijd grue zijn als dat we in onze wereld hebben om aan te nemen dat alle smaragden altijd groen zijn. Om deze reden kunnen we ons afvragen hoe we het maken van inductieve gevolgtrekkingen kunnen rechtvaardigen.

Het probleem van causaliteit Een tweede probleem dat David Hume uitwerkte, was het probleem van causaliteit. Dit probleem van causaliteit zal ik uitleggen aan de hand van twee voorbeelden.

Voorbeeld 1 Een eerste voorbeeld gaat over botsende biljartballen. Als een eerste biljartbal op een tweede biljartbal botst, nemen we waar dat deze tweede biljartbal gaat bewegen. In alle gevallen die we tot nu toe hebben waargenomen is dit het geval en we hebben nog nooit waargenomen dat de tweede biljartbal niet gaat bewegen (mits de eerste genoeg snelheid heeft).

Voorbeeld 2 In een tweede voorbeeld nemen we dagelijks waar dat als om vijf uur ’s middags de kerkklok slaat, alle arbeiders de fabriek uit komen. Ook hier is dit altijd het geval en hebben we nog nooit waargenomen dat de ene gebeurtenis niet op de andere volgt.

In voorbeeld 1 is het een vanzelfsprekende conclusie dat de botsing van de eerste biljartbal tegen de tweede ervoor zorgt dat de tweede in beweging komt. We spreken hier dus van een causale relatie. In voorbeeld 2 echter vertelt ons gezonde verstand ons dat de klokslagen niet de reden kunnen zijn dat de arbeiders de fabriek uit komen.

Als we naar beide voorbeelden kijken, lijkt er weinig verschil te zijn tussen de waarnemingen die we doen. We zien in beide gevallen twee gebeurtenissen die altijd in de tijd op elkaar volgen. Toch spreken we in het eerste voorbeeld van een causale relatie en in het tweede voorbeeld niet. Wat leidt ons tot deze verschillende conclusies? Dit is de vraag waar David Hume zich mee bezig heeft gehouden.

¹In de originele formulering van de grue paradox gebruikte Goodman niet het jaartal 2500, maar het jaartal 2000. De essentie is echter dat het een jaartal is in de verre toekomst. Om deze reden wordt nu vaak het jaartal 2500 gebruikt in de formulering van deze paradox (Wikipedia, 2006d).

Hume (Hume, 1739 (n.d.), 1748 (2001)) heeft onderzocht wat de eigenschappen van causale relaties zijn. De drie belangrijkste eigenschappen die hij onderscheidt zijn:

1. Verbondenheid in plaats: de twee gebeurtenissen in de causale relatie moeten elkaar raken, zoals de biljartballen in het eerste voorbeeld. Is dit niet het geval, maar spreken we toch van een causale relatie, dan betekent dit dat er een langere keten van causale relaties tussen beide gebeurtenissen moet zitten.
2. Verbondenheid in tijd: de oorzaak gaat altijd in tijd vooraf aan het gevolg.
3. Oorzaak en gevolg blijken altijd samen op te treden: er kunnen geen uitzonderingen zijn in een causale relatie. Het is wel mogelijk dat causale effecten niet of in mindere mate optreden, doordat andere factoren deze effecten onderdrukken.

Deze drie eigenschappen van causale relaties blijken echter niet een voldoende karakterisering. Tenslotte kunnen deze drie eigenschappen ook in voorbeeld twee teruggevonden worden, terwijl we hier niet spreken van een causale relatie.

Omdat deze drie eigenschappen geen voldoende karakterisering van causale relaties blijken te zijn, onderzoekt Hume verder waar ons idee van causaliteit vandaan komt. Hij stelt dat alle ideeën in onze geest veroorzaakt worden door impressies die we opdoen uit onze ervaring. Als we dus causale relaties willen onderzoeken, moeten we volgens Hume kijken naar de impressies die aan dit idee vooraf gaan. De impressies die hij onderscheidt waar we hierbij naar moeten zoeken zijn impressies van 'power, force, energy and necessary connexion'. Hij concludeert na uitgebreid onderzoek dat deze impressies nergens in onze ervaring te vinden zijn.

Als deze impressies niet in onze ervaring te vinden zijn, blijft het nog steeds de vraag waar we het idee van causaliteit vandaan krijgen. Hume stelt dat we causale relaties nooit zien als we twee gebeurtenissen slechts één keer op elkaar zien volgen. Pas als we de verbondenheid een aantal keer hebben waargenomen, trekken we volgens hem conclusies over de causale relatie tussen beide. Hume stelt dat er geen objectief verschil is tussen de eerste keer dat we iets waarnemen en de volgende keer. De reden waarom we toch een causale relatie hierin beginnen waar te nemen, is volgens hem dat onze geest gewend raakt aan de verbondenheid en op deze manier zich de causale relatie gaat verbeelden.

Humes conclusie dat causale relaties niet in de wereld maar in onze verbeelding zitten, heeft voor veel filosofische discussie gezorgd. Causale relaties nemen namelijk een belangrijke plaats in in ons redeneren. Vooral in de natuurwetenschappen heeft het probleem van causaliteit tot veel vragen geleid. In de natuurwetenschappen wordt namelijk gestreefd naar een objectieve beschrijving van de wereld. Vanuit het idee dat causale relaties alleen in onze verbeelding een rol spelen, zouden we, als we streven naar objectieve kennis, hierbij dus geen gebruik moeten maken van causale redematies. Humes essays hebben daarom grote invloed gehad op de wetenschapsfilosofie.

1.1.2 Twee wetenschapsfilosofische tradities

Naar aanleiding van Humes werk over het probleem van causaliteit, hebben veel filosofen pogingen ondernomen om dit probleem van causaliteit op te lossen. Dit heeft niet geleid tot universele overeenstemming over de rol van causaliteit. Vanuit deze achtergrond zijn er in de loop van de tijd twee wetenschapsfilosofische tradities ontstaan (Salmon, 2002).

Een eerste wetenschapsfilosofische traditie stelt dat causaliteit een onmisbare rol speelt in natuurwetenschappelijke verklaringen. Deze traditie is rond de jaren 1950 uitgewerkt door Michael Scriven. In deze traditie wordt gesteld dat het verklaren van een gebeurtenis het identificeren van haar oorzaak is (Salmon, 2002, p. 93).

Een tweede wetenschapsfilosofische traditie 'lost het probleem van causaliteit in natuurwetenschappelijke verklaringen op' door te stellen dat in dit soort verklaringen op een andere manier geredeneerd wordt, en dat causaliteit hierin juist een minimale rol speelt. Hieronder zal ik deze wetenschapsfilosofische traditie verder bespreken.

1.2 Verklaringen in termen van algemene wetten: het logisch positivisme

Een belangrijke stroming in de wetenschapsfilosofie aan het eind van de 19^e en begin van de 20^e eeuw was het logisch positivisme. Deze stroming hechtte veel waarde aan mathematische methodes in de wetenschap. Theorieën en hun axiomatisering stonden hierbij centraal. Vanuit de axiomatische vorm van theorieën konden empirische consequenties worden gededuceerd, die volgens het logisch positivisme gezien konden worden als hypothesen. Om deze reden werd dit de hypothetico-deductieve methode genoemd. In deze stroming zag men het omzetten van theorieën in hun geaxiomatiseerde vorm als het doel van de wetenschap.

Een bekende filosoof binnen het logisch positivisme was Carl Gustav Hempel (1905-1997). Hempel heeft zijn filosofie erop gericht een vorm van wetenschap te beschrijven waarin causaliteit en inductie geen rol meer spelen. Hiervoor heeft hij zijn 'covering-law model' van wetenschappelijke verklaringen opgesteld. Dit is een verzamelnaam voor twee soorten wetenschappelijke verklaringen: deductief-nomologische en probabilistisch-statistische (Hempel, 2002, 1966, 1965). De logische schema's die hij hiervoor heeft uitgewerkt zijn te vinden in figuur 1.1 en 1.2.

De vorm van de deductief-nomologische verklaringen is hetzelfde als van de *modus tollens*. Een voorbeeld van verklaringen van deze vorm is te vinden in figuur 1.3. Een voorbeeld van een probabilistisch-statistische verklaring wordt gegeven door Hempel (Hempel, 1965) en is te vinden in figuur 1.4

Omdat de vorm van natuurwetenschappelijke verklaringen die Hempel beschrijft deductieve redeneringen zijn, is het probleem van inductie hierbij niet aan de orde. Verder stelt Hempel dat in dit soort verklaringen causaliteit geen rol speelt. Natuurwetenschappelijke verklaringen zijn volgens hem dus verklaringen in termen van algemene wetten in plaats van verklaringen op basis van causaliteit (Salmon, 2002).

$$\frac{C_1, C_2, \dots, C_k}{L_1, L_2, \dots, L_r} \\ E$$

Figuur 1.1: Schema van deductief-nomologische verklaringen (Hempel, 1965, p. 47). Hierbij staan $C_1, C_2, \dots, C_k$ voor statements over specifieke feiten. $L_1, L_2, \dots, L_r$ representeren de algemene wetten die een rol spelen in de wetenschappelijke verklaring. Deze vormen samen het explanans, en leiden tot het explanandum, de conclusie E .

$$\frac{F_i}{\frac{p(O, F) \text{ is very high}}{O_i}}$$

Figuur 1.2: Schema van probabilistisch-statistische verklaringen (Hempel, 1965, p. 50). F_i stelt hierbij voor dat in geval i bepaalde factoren F gerealiseerd zijn. 'P(O, F) is very high' representeert hier een probabilistische wet. O_i vormt hier het explanandum en geeft weer dat in een bepaalde geval i een uitkomst O optrad.

$$\frac{\text{Socrates is a man (C)} \\ \text{All men are mortal (L)}}{\text{Socrates is mortal (E)}}$$

Figuur 1.3: Voorbeeld van een modus tollens-redenatie

$$\frac{\text{John Doe had a hay fever attack and took 8 milligrams of chlortrimeton (Fi)} \\ \text{The probability for subsidence of a hay fever attack upon administration} \\ \text{of 8 milligrams of chlortrimeton is high (p(O,F))}}{\text{John Doe's hay fever attack subsided (Oi)}}$$

Figure 1.4: Voorbeeld van een probabilistisch-statistische verklaring (Hempel, 2002, p. 50)

We kunnen ons afvragen hoe de algemene wetten, die volgens Hempel aan de basis liggen van natuurwetenschappelijke verklaringen, verkregen worden. Als deze wetten inductief zouden worden afgeleid, zou het probleem van inductie en causaliteit in de wetenschap nog steeds aan de orde zijn.

Hempel stelt dat deze algemene wetten niet via inductie maar middels ‘creative imagination’ en ‘happy guesses’ gevonden worden:

“The transition from data to theory requires creative imagination. Scientific hypotheses and theories are not *derived* from observed facts, but *invented* in order to account for them. They constitute guesses at the connections that might obtain between the phenomena under study, at uniformities and patterns that might underlie their occurrence. “Happy guesses” of this kind require great ingenuity, especially if they involve a radical departure from current modes of scientific thinking, as did, for example, the theory of relativity and quantum theory.” (Hempel, 1966, p. 15)

Veel logisch positivisten zijn het met Hempel eens dat wetten op een niet-rationele manier gevonden worden. Nadat de wetten testen met de empirie succesvol hebben doorstaan, kunnen ze worden geaccepteerd en uiteindelijk worden geaxiomatiseerd.

Een specifieke visie die hier nauw verband mee houdt, is de rationele reconstructie van de wetenschap. De algemene aanpak hiervan kan worden gezien in het onderscheid dat Hans Reichenbach (1891-1953) voor het eerst maakte. Hij maakte een onderscheid tussen de ‘context of discovery’ en de ‘context of justification’. Volgens hem gebeurt het ontdekken van een theoretische wet op basis van puur subjectieve redeneringen en speelt hierin de intuïtie van de onderzoeker een belangrijke rol. Dit is een eerste reden waarom volgens Reichenbach (en het logisch positivisme) alleen de ‘context of justification’ interessant was voor de wetenschapsfilosofie (Bailer-Jones, 2004). Een tweede reden is dat voor het logisch positivisme axiomatisering van een theorie erg belangrijk was. Deze axiomatisering was vaak pas mogelijk op het moment dat een theorie gevonden was waar geen uitzonderingen op leken te zijn en vindt dus niet plaats in de ‘context of discovery’ maar in de ‘context of justification’.

Het logisch positivisme heeft op deze manier dus kunnen concluderen dat causaliteit geen rol speelt in natuurwetenschappelijke verklaringen. Ten eerste spelen in de geaxiomatiseerde theorieën causale relaties geen rol meer. Ten tweede wordt de ‘context of discovery’ buiten beschouwing gelaten. In deze ‘context of discovery’ zullen causale relaties wel een rol spelen, maar het logisch positivisme concludeert dat dit niet interessant is voor de wetenschapsfilosofie.

Het probleem van causaliteit in de natuurwetenschappen zoals behandeld door Hume lijkt nu dus door de logisch positivisten opgelost te zijn. Toch blijven hierover nog altijd vragen bestaan. Ten eerste blijkt dat zelfs Hempel met zijn deductief-nomologische verklaringen niet in staat is geweest alle causale relaties uit natuurwetenschappelijke verklaringen uit te bannen. Ten tweede is het de vraag of de hypothetico-deductieve methode wel een goede beschrijving is van hoe men in de wetenschap te werk gaat. Om deze reden zijn er ook filosofen die vasthouden aan het idee dat causaliteit wel een belangrijke rol inneemt in wetenschappelijke verklaringen, zoals ik heb beschreven in paragraaf 1.1.2. Wesley Salmon heeft geprobeerd deze twee visies nader tot elkaar te brengen.

1.3 Een compromis: Wesley Salmon

Zoals ik in paragraaf 1.1.2 heb uitgewerkt, stelt Wesley Salmon (Salmon, 2002) dat er twee tradities te onderscheiden zijn die proberen een karakterisering van wetenschappelijke verklaringen te geven.

Ten eerste onderscheidt hij de stroming van Hempel, die ik hierboven behandeld heb. Bij Hempel is er geen rol voor causaliteit in natuurwetenschappelijke verklaringen. Volgens hem zijn natuurwetenschappelijke verklaringen in termen van algemene wetten.

Een tweede stroming die Salmon onderscheidt werd in eerste instantie door Michael Scriven uitgewerkt en dicht juist wel een belangrijke rol toe aan causaliteit in wetenschappelijke verklaringen.

Het verschil tussen beide stromingen kan volgens Salmon worden gezien als het verschil in het soort vragen dat wordt gesteld. Bij verklaringen in termen van algemene wetten richt men zich op hoe-vragen en vraagt men zich niet af waarom bijvoorbeeld Newtons wetten gelden. In dit soort verklaringen wordt het stellen dat Newtons wet dit voorspelt gezien als voldoende verklaring voor het optreden van het fenomeen. Bij causale verklaringen worden juist vragen gesteld naar *waarom* een fenomeen optreedt (Salmon, 2002).

Vanaf 1957/1958 is er binnen de wetenschapsfilosofie veel geschreven over natuurwetenschappelijke verklaringen. Hierbij zijn beide stromingen loodrecht tegenover elkaar komen te staan (Salmon, 2002). Salmon werkt uit dat beide visies echter niet lijnrecht tegenover elkaar hoeven te staan, omdat ze elkaar ook kunnen aanvullen. Dit doet hij aan de hand van de visie van Peter Railton. Zoals Salmon uitwerkt, heeft Railton in zijn boek 'Probability, explanation and information' beargumenteerd dat er een ideale verklarende tekst is die globaal en gedetailleerd is (Railton, 1981. Zoals geciteerd in Salmon (2002)). Volgens Salmon onderzoeken we nooit de hele tekst, maar altijd kleine gedeeltes ervan. Beide soorten verklaringen kijken hierbij dus naar verschillende delen van de ideale tekst.

Een voorbeeld dat Wesley Salmon geeft van een wetenschapsgebied waarin duidelijk naar voren komt dat beide soorten verklaringen een rol spelen, is de kwantummechanica. Hierbij spelen zowel verklaringen in termen van algemene wetten als causale verklaringen een rol. Een voorbeeld van een verklaring in termen van algemene wetten in de kwantummechanica is een verklaring die wordt gegeven in termen van de Schrödingervergelijking. Hierbij wordt op basis van de Schrödingervergelijking verklaard hoe de toestand van een systeem in de loop van de tijd verandert. Causale verklaringen kunnen worden gegeven in termen van interacties tussen deeltjes, zoals elektronen.

Salmon concludeert dat verklaringen zowel antwoorden kunnen zijn op waarom-als op hoe-vragen, afhankelijk van of er een causaal of non-causaal mechanisme in de wereld aan het fenomeen ten grondslag ligt:

"I now think that an adequate scientific explanation identifies the mechanisms by which the explanandum came about. Consequently, what constitutes a suitable scientific explanation depends on the kinds of mechanisms - causal or noncausal - that are operative in our world. This is an issue that cannot be settled a priori." (Salmon,

1989, pp. 149-150)

Uit bovenstaande blijkt dat Wesley Salmon van mening is dat er veel verschillende soorten natuurwetenschappelijke verklaringen mogelijk zijn. Om deze reden is het volgens hem moeilijk een algemene karakterisering te geven van dit soort verklaringen. Daarom stelt hij zich de vraag of het misschien niet mogelijk is een lijst van deugden op te stellen van natuurwetenschappelijke verklaringen in plaats van te streven naar een algemene beschrijving van dit soort verklaringen.

Terugkijkend op paragraaf 1.1 en 1.2 kunnen we concluderen dat Hume zich vooral richtte op de rol van empirische kennis in wetenschappelijke verklaringen; de logisch positivisten richtten zich vooral op de rol van theoretische kennis in wetenschappelijke verklaringen. Als we naar de natuurwetenschappelijke praktijk kijken, blijkt echter nog een derde soort kennis een belangrijke rol te spelen in natuurwetenschappelijke verklaringen. Dit is kennis uit modellen. De volgende paragraaf zal gewijd zijn aan deze rol van modellen in natuurwetenschappelijke verklaringen.

1.4 Modellen in wetenschappelijke verklaringen

Bij de karakterisering van natuurwetenschappelijke verklaringen heeft men zich in de wetenschapsfilosofie tot halverwege de 20^e eeuw vooral gericht op theorie en empirie. Men zag het hierbij als doel van de natuurwetenschappen theoretische wetten op te stellen, die vervolgens aan de empirie konden worden getoetst.

Als we naar de praktijk van de natuurwetenschappen kijken, kunnen we echter nog een derde soort kennis onderscheiden die hierin een belangrijke rol lijkt te spelen. Dit is de kennis die we opdoen uit modellen. Een algemeen beeld dat we van modellen hebben is dat ze 'iets' representeren.

Modellen kunnen op meerdere vlakken een rol spelen in natuurwetenschappelijk onderzoek. Hieronder zal ik kort twee soorten van gebruik van modellen uitwerken die we regelmatig in dit soort onderzoek tegenkomen.

Een eerste geval waarin we modellen tegenkomen is het modelleren van een probleem om een wiskundige of systematische beschrijving hiervan te kunnen geven. Hierdoor wordt het uitwerken en oplossen van het probleem vergemakkelijkt. In dit wiskundig modelleren worden bepaalde aannames gemaakt en worden bepaalde factoren verwaarloosd. Als het model uitgewerkt is kunnen er correcties worden uitgevoerd om het gemodelleerde systeem meer op het fysische systeem te laten lijken. Een voorbeeld hiervan is het modelleren van een oscillator als een harmonische oscillator. Hierbij worden bepaalde factoren, zoals weerstand, buiten beschouwing gelaten. Op deze manier wordt het probleem makkelijker op te lossen en kunnen er wetten voor de harmonische oscillator afgeleid worden. Vervolgens is het mogelijk hierop correcties door te voeren, zodat we steeds dichterbij een beschrijving van de werkelijke oscillator komen.

Een tweede geval waarin we modellen tegenkomen is bij het beschrijven van niet-observeerbare fenomenen. Een voorbeeld hiervan is de beschrijving van het atoom door Bohr. Hierbij wordt de kern van het atoom voorgesteld als een statisch geheel, bestaande uit protonen en neutronen. Hieromheen bewegen

zich elektronen in banen vergelijkbaar met de planetenbanen (in cirkels, zoals deze tot in de zestiende eeuw beschreven werden). Toen dit model opgesteld werd, werd het hierboven geschetste beeld gezien als een realistische beschrijving van de werkelijkheid. Onder invloed van ontwikkelingen van theorieën als de kwantummechanica bleek later dat dit model geen realistische beschrijving van de werkelijkheid kan zijn. Toch wordt het model nog steeds veel gebruikt. Een model kan voor verschillende doeleinden gebruikt worden. We gebruiken het Bohrse atoommodel vaak als heuristisch middel.

Modellen zijn erg belangrijk in de natuurwetenschappen. Er worden zelfs in veel opleidingen hele vakken gewijd aan de kunst van het modelleren. In de natuurwetenschap is men dan ook van mening dat een belangrijk kenmerk van een goede onderzoeker is dat hij goede modellen op kan stellen.

Toch heeft men zich in de wetenschapsfilosofie tot de jaren 1950 nauwelijks beziggehouden met de rol van modellen in de wetenschap. Zoals Daniela Bailer-Jones aangeeft, zijn er hiervoor verschillende redenen aan te geven (Bailer-Jones, 2004). Een van de belangrijkste redenen hiervoor is de grote invloed van het logisch positivisme in deze tijd (zie paragraaf 1.2). Hierbij had men alleen aandacht voor de 'context of justification' en niet voor de 'context of discovery', omdat deze laatste gezien werd als een subjectieve fase in het onderzoek. Modellen werden gezien als onderdeel van het ontdekkingsproces en dus subjectief en niet interessant voor de wetenschapsfilosofie.

Een andere reden die Bailer-Jones aangeeft waarom er voor 1950 weinig aandacht was voor modellen in de wetenschap, is dat de definitie van modellen voor 1950 beperkter was dan nu (Bailer-Jones, 2004). In de 19^e eeuw werden modellen vooral gezien als fysieke modellen, oftewel een soort schaalmodellen. In deze tijd werd overigens ook een rol onderscheiden voor modellen zoals wij ze nu zien. Deze werden echter geen modellen maar analogieën genoemd. Een voorbeeld hiervan, gegeven door Bailer-Jones (Bailer-Jones, 2004), is te vinden in het werk van de mathematisch fysicus James Clerk Maxwell. Hij maakte gebruik van analogieën met onder andere de klassieke mechanica om zijn veldvergelijkingen op te stellen.

Aan het eind van de 19^e eeuw begonnen nieuwe theorieën in de fysica, zoals de relativiteitstheorie en de kwantummechanica, zich te ontwikkelen. Van deze theorieën was het niet langer mogelijk een fysiek model te maken. Om deze reden werd er door wetenschapsfilosofen steeds minder aandacht besteed aan modellen in de wetenschap. Pierre Duhem, wetenschapsfilosoof en fysicus, maakte het gebruik van modellen zelfs belachelijk:

"We thought we were entering the tranquil and neatly ordered abode of reason, but we find ourselves in a factory." (Duhem, [1914] 1954, pp. 70-71. Zoals geciteerd in Bailer-Jones (2004))

Bovenstaande twee redenen hebben er niet alleen voor gezorgd dat er weinig aandacht in de wetenschapsfilosofie voor modellen was. Ze hebben er ook toe geleid dat de term model een negatieve weerklank heeft gekregen. Vaak wordt deze term gebruikt in de betekenis van: het is 'maar' een model en dus geen exacte representatie van de werkelijkheid.

Toch is er vanaf de jaren 1950 in de wetenschapsfilosofie meer aandacht geko-

men voor de rol van modellen in de natuurwetenschappen. De reden hiervoor is dat in de jaren 1950 de Britse filosofen Mary Hesse, Ernest Hutten en Richard Braithwaite een aantal overwegingen publiceerden waarom modellen wél interessant zijn voor de wetenschapsfilosofie. De visie van deze drie filosofen heeft geleid tot de semantische visie op modellen.

Deze visie op modellen dicht een belangrijke waarde toe aan het concept 'model', dat als volgt gedefinieerd wordt:

"Let S be a set of statements comprising some theory, and S^* the calculus of this set. Let S' be a set of statements obtained from S^* . Then S' is a model for S^* ." (Achinstein, 1968, p. 228)

Hierbij is een model dus een fysische interpretatie van de abstracte calculus van de theorie.

Aanhangers van de semantische visie op modellen zijn van mening dat modellen worden afgeleid uit theorie. Er kunnen veel verschillende soorten modellen in de natuurwetenschappen onderscheiden worden. De semantische visie is de enige wetenschapsfilosofische theorie over modellen die heeft geprobeerd een geünificeerd schema op te stellen voor de verschillende soorten modellen.

Er zijn ook veel filosofen die het niet eens zijn met deze semantische visie. Zij stellen dat modellen te divers zijn om er een algemene beschrijving van te kunnen geven. Om deze reden heeft men zich vaak gericht op het klassificeren van verschillende soorten modellen en het geven van een aantal algemene karakteristieken van modellen.

Veel filosofen hebben specifieke eigenschappen van modellen besproken. Een aantal filosofen hierbij zijn belangrijk geweest in de ontwikkeling van ons denken over modellen. Hieronder zal ik een aantal basisideeën van hen behandelen.

Autonomous agents Morrison en Morgan behandelen in hun 'Models as mediators' (Morrison & Morgan, 1999) de rol van modellen in de natuurwetenschappen. Zij zijn, in tegenstelling tot wat de semantische visie hierover zegt, van mening dat modellen niet afgeleid zijn uit de theorie. Volgens Morrison en Morgan zijn modellen, omdat ze niet direct uit theorie of empirie afgeleid zijn, gedeeltelijk onafhankelijk van beide. Om deze reden noemen ze modellen ook wel 'autonomous agents'. Doordat modellen gedeeltelijk onafhankelijk zijn van theorie en empirie, stellen Morrison en Morgan dat modellen kunnen mediëren tussen theorie en fenomeen. Door het gebruik van modellen kunnen we volgens deze visie dus het gat tussen theorie en fenomeen overbruggen.

Models as works of fiction Een andere filosoof die belangrijke claims heeft gemaakt over modellen is Nancy Cartwright. In haar filosofie dicht ze de volgende eigenschappen toe aan theorie (Bailer-Jones, 2004):

1. Het heeft een abstracte mathematische structuur
2. Het bestaat uit formules met gaten erin
3. Het heeft geen relatie met de realiteit

Theorie is in haar visie dus erg abstract en ver van de fenomenen verwijderd. Om deze reden is ze het met Morrison en Morgan eens dat modellen essentieel zijn

om theorieën te kunnen relateren aan fenomenen, omdat ze kunnen mediëren tussen fenomeen en wereld.

Cartwright werkt haar ideeën over modellen uit binnen een visie over natuurwetenschappelijke verklaringen. In deze visie op natuurwetenschappelijke verklaringen stelt ze dat het feit dat een verklaring grote verklarende kracht bezit niets zegt over de waarheid of onwaarheid van deze verklaring. Om deze stelling wordt haar visie een simulacrum-visie op verklaringen genoemd. Dit is gebaseerd op de definitie van simulacrum uit de Oxford English Dictionary: "something having merely the form or appearance of a certain thing, without possessing its substance or proper qualities" (Cartwright, 1983, pp. 152-153)

Volgens Cartwright is een belangrijke functie van een model het verklaren van een fenomeen. Als we dit binnen haar simulacrum-visie op verklaringen zien, kunnen we dus stellen dat er volgens haar alleen uitspraken kunnen worden gedaan over de verklarende kracht van een model en niet over zijn waarheid of onwaarheid.

Cartwright stelt zelfs dat modellen gezien kunnen worden als fictie:

"[a] model is a work of fiction. Some properties ascribed to objects in the model will be genuine properties of the objects modeled, but others will be merely properties of convenience." (Cartwright, 1983, p. 153)

Volgens Cartwright kunnen modellen vergeleken worden met fabels (Cartwright, 1999, p. 36). Beide zijn namelijk volgens haar een werk van fictie dat tot doel heeft een abstracter iets te verklaren. In een fabel wordt een moraal door middel van een verhaal uitgewerkt. In modellen is ook een soortgelijke relatie te vinden. Hierbij kan de moraal van de fabel gezien worden als de abstracte theorie. Het model heeft tot doel een concrete uitwerking te geven van deze abstracte theorie.

1.5 Drie soorten kennis

In bovenstaande paragraaf heb ik verschillende visies op modellen uitgewerkt. Zoals Bailer-Jones aangeeft is er geen duidelijke, eenduidige visie op modellen. Zij stelt dat veel onderzoek langs elkaar heen loopt en dat iedereen zijn eigen definities van verschillende soorten modellen hanteert. Een reden hiervoor zou kunnen zijn dat, zoals Peter Achinstein van mening is, het niet mogelijk is een algemene theorie voor modellen op te stellen.

Toch kan in ieder geval één ding worden geconcludeerd: de publicaties van Hesse, Hutten en Braithwaite in de jaren 1950 hebben ertoe geleid dat er meer aandacht is voor de rol van modellen in de wetenschap. Dit betekent niet dat er geen aandacht meer is voor theorie. Beide zijn op gelijke voet komen te staan.

Op deze manier zijn er dus drie soorten kennis te onderscheiden die een rol kunnen spelen in natuurwetenschappelijk onderzoek: theoretische kennis, empirische kennis en kennis uit modellen. Deze drie soorten kennis en hun rol in natuurwetenschappelijk onderzoek zal ik in het komende hoofdstuk verder uitwerken.

Hoofdstuk 2

Verschillende soorten kennis in natuurwetenschappelijke experimenten

In dit hoofdstuk zal ik op basis van literatuurstudie een antwoord proberen te geven op de vraag welke verschillende soorten kennis een rol kunnen spelen bij het opzetten van natuurwetenschappelijke experimenten. Het doel van het onderscheiden van deze verschillende soorten kennis is het creëren van een kader waarin empirische waarnemingen kunnen worden geplaatst en geïnterpreteerd.

Bij het onderscheiden van verschillende soorten kennis zijn twee eigenschappen van belang: de aard en het toepassingsbereik van de kennis. Het toepassingsbereik geeft aan waarop de kennis van toepassing is. Levert het experiment alleen kennis op over hoe het fenomeen optreedt in dit experiment? Of kunnen we uit het experiment concluderen dat dit fenomeen ook buiten het experiment optreedt? De aard van de kennis geeft aan of we te maken hebben met kennis uit theorie, empirie of modellen. Dit zijn de drie soorten kennis die in het vorige hoofdstuk naar voren kwamen. Hieronder zal ik deze verschillende soorten kennis uitwerken.

2.1 De aard van de kennis

2.1.1 Theoretische kennis

Bij het onderscheiden van verschillende soorten kennis die een rol kunnen spelen in experimenten in de natuurwetenschappen, onderscheiden veel filosofen de categorie 'theoretische kennis'. Hiervan worden door verschillende filosofen vaak verschillende definities gegeven. Twee extremen die in deze definities te vinden zijn, zijn aan de ene kant de Semantic View; aan de andere kant de Received View (Suppe, 1974). De Semantic View ziet ongeïnterpreteerde axioma's als enige onderdeel van de theorie. De Received View (logisch positivisten zoals Hempel en Carnap) daarentegen, schaart veel meer kennis onder de noemer theoretische kennis. Zij zien alle logische formuleringen plus hun correspondentieregels als onderdeel van de theorie. Deze correspondentieregels verbinden de theoretische termen met de observationele termen.

Voor mijn onderzoek heb ik ervoor gekozen in mijn definitie van theoretische kennis dicht bij de semantische visie te blijven. Dit lijkt praktischer, omdat de kwantummechanica grotendeels bestaat uit mathematische beschrijvingen. Juist door het onderscheid te maken in verschillende soorten van mathematische beschrijvingen, is het mogelijk goed te analyseren welke rol deze beschrijvingen spelen.

Grofweg is nu een onderscheid te maken tussen mathematische beschrijvingen waarin bepaalde fysische aannames zijn gemaakt en beschrijvingen waarin dit niet het geval is. Deze eerste zal ik nomo-mathematische modellen noemen en zal ik uitwerken in paragraaf 4.2; de tweede vallen onder theoretische kennis. Hieronder zal ik deze tweede categorie uitwerken.

Peter Achinstein werkt in zijn "Concepts of Science" (Achinstein, 1968) uit hoe in de semantische visie een onderscheid gemaakt wordt tussen theorie en modellen. Hij stelt dat volgens deze visie de axioma's van een theorie gezien kunnen worden als een ongeïnterpreteerde string van symbolen of als geïnterpreteerde proposities. In de semantische visie worden de eerste de calculus van deze theorie genoemd. De geïnterpreteerde proposities worden het model voor de calculus van de theorie genoemd (Achinstein, 1968, pp. 227-228).

Een voorbeeld van ongeïnterpreteerde axioma's zijn de Euclidische axioma's van de geometrische ruimte. Euclides van Alexandrië heeft in de derde eeuw voor Christus in zijn boek "De Elementen" een aantal definities en axioma's gegeven waarop de Euclidische meetkunde gebaseerd is. Voorbeelden hiervan zijn de definitie dat een lijn een breedteloze lengte is en het postulaat dat alle rechte hoeken aan elkaar gelijk zijn.

Een ander voorbeeld van ongeïnterpreteerde axioma's zijn de axioma's die gebruikt worden om een Hilbertruimte te definiëren. Bij de definitie van een Hilbertruimte wordt een inproduct op deze ruimte gedefinieerd, waaruit een norm te definiëren is. Een ruimte is een Hilbertruimte als zij compleet is ten opzichte van deze norm. Dit zijn dus puur mathematische definities waar (nog) geen enkele fysische betekenis aan verbonden is.

Nancy Cartwright is het met de semantische visie eens dat ongeïnterpreteerde axioma's onderdeel zijn van theoretische kennis. Zij stelt echter dat theoretische kennis niet alleen bestaat uit ongeïnterpreteerde axioma's. Een ander belangrijk onderdeel van theorie wordt volgens haar gevormd door fundamentele fysische wetten. Voorbeelden hiervan zijn de wet van behoud van energie, de wet van behoud van impuls en Einsteins postulaat in de relativiteitstheorie dat de lichtsnelheid eindig en constant is.

Cartwright onderscheidt ook een derde onderdeel van theorie. Zij stelt dat het postulaat dat bepaalde ongeïnterpreteerde axioma's van toepassing zijn op een specifiek soort fysische systemen, ook onderdeel vormt van de theorie. Een voorbeeld hiervan is het postulaat dat de axioma's van de Hilbertruimte van toepassing zijn op kwantummechanische systemen. Deze toekenning is niet eenduidig bepaald, maar komt goed overeen met experimentele resultaten.

In mijn scriptie zal ik onder theoretische kennis dus verstaan:

1. Ongeïnterpreteerde axioma's

2. Fundamentele, fysische wetten

3. Postulaten dat bepaalde ongeïnterpreteerde axioma's van toepassing zijn op een specifiek soort fysische systemen

In de fysica zijn veel voorbeelden te vinden waarin dit idee van theoretische kennis terug te vinden is. Er worden bepaalde axioma's opgesteld waarbinnen wordt geredeneerd. Als dit niet overeen blijkt te komen met de empirie of onze intuïties, kunnen de fysische systemen aan andere axioma's worden toegekend. Hieronder zal ik twee voorbeelden hiervan uitwerken.

Een eerste voorbeeld is de ontwikkeling van de relativiteitstheorie. Men ging in de natuurkunde altijd uit van de axioma's van de Euclidische ruimte. Bij de ontwikkeling van de algemene relativiteitstheorie, bleek deze Euclidische geometrie niet meer vruchtbaar voor de natuurkunde. De algemene relativiteitstheorie gaat uit van een gekromde ruimte, waardoor basisideeën uit de Euclidische meetkunde niet meer opgaan. Voorbeelden hiervan zijn dat in deze gekromde ruimte de drie hoeken van een driehoek niet meer samen 180 graden zijn. Een ander voorbeeld is dat parallelle lijnen elkaar in gekromde ruimtes kunnen kruisen. Hierdoor moesten dit soort fysische systemen worden toegekend aan andere theoretische axioma's en werd er in de relativiteitstheorie gewerkt met non-Euclidische ruimtes. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van de axioma's van de Minkovsky-ruimte.

Behalve een verandering van de axioma's die worden gebruikt, is het ook mogelijk dat een verandering in de gehanteerde behoudswetten optreedt. Een voorbeeld hiervan is de wet van behoud van massa die lang in de natuurkunde gehanteerd werd. Pas in de 20^e eeuw bleek deze wet niet meer altijd op te gaan. Albert Einstein heeft in deze eeuw zijn beroemde formule $E = mc^2$ opgesteld, waarbij massa dus gezien wordt als een manifestatie van energie. Hierdoor is niet massa, maar energie de behouden grootheid. In de natuurkunde wordt overigens voorspeld dat massa alleen in uitzonderlijke gevallen niet behouden wordt, bijvoorbeeld in de hogere energiefysica. Een voorbeeld hiervan is de annihilatiereactie van een deeltje en zijn antideeltje, dus bijvoorbeeld een elektron en een positron die samen een foton vormen. In tegenstelling tot elektronen, heeft een foton in vacuüm geen massa; in deze reactie wordt massa dus niet behouden, energie daarentegen wel.

Bovenstaande definitie van theorie lijkt dus goed van toepassing te zijn op de wetenschappelijke praktijk. Er lijken inderdaad a priori axioma's en fundamentele wetten op fysische systemen te worden toegepast. Als deze niet in overeenstemming blijken te zijn met de empirie, worden ze verworpen en vervangen door andere axioma's.

Er is nu een belangrijke conclusie te trekken uit deze definitie van theorie. Causaliteit blijkt nu namelijk in de theorie geen rol te spelen. De theorie is een stelsel abstracte vergelijkingen van correlaties tussen grootheden, en doet hierbij geen uitspraak of we hierbij te maken hebben met een causale relatie. Pas in de modellen en in de empirische kennis komen causale componenten aan bod.

In de volgende paragraaf zal ik de rol die empirische kennis kan spelen in natuurwetenschappelijke experimenten behandelen.

2.1.2 Empirische kennis

Om een antwoord te vinden op de vraag welke rol kennis uit ervaring kan spelen in het opzetten en interpreteren van experimenten, kunnen twee soorten kennis uit ervaring worden onderscheiden. Ten eerste is dit de kennis uit ervaring, waarbij op puur empirische gronden wordt geredeneerd. Een voorbeeld van een filosoof die zich met dit soort kennis heeft beziggehouden is Davis Baird (Baird, 2003). Een tweede soort kennis uit ervaring die kan worden onderscheiden bestaat uit empirische generalisaties. Deze generalisaties worden gemaakt op basis van inductie. Hierbij wordt niet alleen op basis van empirie geredeneerd; er worden ook aannames gemaakt, zoals het principe van causaliteit. Dit soort empirische kennis wordt behandeld door Rainer Lange in zijn artikel "Technology as Basis and Object of Experimental Practices" (Lange, 2003). Hieronder zal ik de ideeën van Davis Baird en Rainer Lange over empirische kennis uitwerken.

Ervaringskennis

In zijn artikel "Thing Knowledge: Outline of a Materialist Theory of Knowledge" bespreekt Davis Baird zijn historisch onderzoek naar technologische ontwikkeling (Baird, 2003). Hij concludeert uit dit onderzoek dat het soms voorkomt dat technologische ontwikkeling voorafgaat aan theoretische ontwikkeling. Een voorbeeld dat hij hiervan behandelt is de ontwikkeling van de elektromotor door Thomas Davenport:

"Davenport was able to see relationships in the material terms in which they were presented in Henry's electromagnet. He could manipulate these relationships in his mind's eye and ultimately manually to make something new. He was not working with equations or propositions. He was working with materials." (Baird, 2003, p. 40)

Een ander voorbeeld hiervan dat Baird bespreekt is dat van de ontwikkeling van de Faradays motor door Michael Faraday:

"When he first made the motor, there was considerable disagreement over the explanation of the phenomenon it exhibited. Yet, no one contested what the apparatus did: It exhibited a kind of rotary motion as a consequence of a suitable combination of electric and magnetic elements. It exhibited a phenomenon for which, at the time, there was no adequate theoretical language." (Baird, 2003, p. 47)

Uit beide voorbeelden blijkt dat de onderzoekers niet werkten met theorie of met empirische generalisaties, maar alleen met kennis die ze uit ervaring hadden opgedaan. Op basis van alleen deze kennis waren ze in staat apparaten te ontwikkelen, te manipuleren en te gebruiken. Hieruit concludeert Baird dat technologische ontwikkeling mogelijk is zonder gebruik te maken van theoretische kennis.

Het soort kennis dat de onderzoekers opdeden uit ervaring noemt Davis Baird ervaringskennis. Ervaringskennis zoals Baird dit definieert is breder dan hoe filosofen als Hume de term 'kennis uit ervaring' gebruikten. Voor Davis Baird speelt hierbij niet alleen de kennis die we puur uit de empirie verkregen een

rol, maar ook een gevoel dat een onderzoeker kan krijgen voor een apparaat. Baird hecht veel waarde aan ervaringskennis, omdat juist dit gevoel van een onderzoeker volgens hem belangrijk is voor technologische ontwikkelingen.

Er is nog een reden waarom Baird grote waarde hecht aan ervaringskennis. Hij stelt namelijk dat in tegenstelling tot kennis uit modellen en theoretische kennis, ervaringskennis contextonafhankelijk is. Een voorbeeld dat Baird hiervan geeft is het begrip van hoeveel arbeid een apparaat verricht (Baird, 2003, p. 50). Aan het eind van de 18^e eeuw ontwikkelden James Watt en John Southern een apparaat om de 'duty' of 'steam economy' van een machine te meten. In de loop van de tijd is men echter steeds minder gebruik gaan maken van deze termen, en ging men denken in termen van 'kracht' en 'arbeid'. Het instrument meet nog steeds precies hetzelfde; hetgeen dat het meet noemen we nu echter 'arbeid' in plaats van 'duty' of 'steam economy'. Dit is een voorbeeld van hoe kennis uit modellen veranderd is door een verandering van de context. De fenomenen die gecreëerd zijn blijven echter onveranderd bestaan, omdat ze contextonafhankelijk zijn. Omdat ervaringskennis contextonafhankelijk is, concludeert Baird dat ervaringskennis de ontwikkeling van nieuwe instrumenten, modellen en theorie kan stimuleren.

Baird stelt dus dat er in de wetenschapsfilosofie meer waarde gehecht moet worden aan instrumenten en de ervaringskennis die zij omvatten dan tot nu toe wordt gedaan. Hij pleit er zelfs voor instrumenten epistemologisch gelijk te stellen aan theoretische kennis.

Hoewel Davis Baird op basis van zijn historische studie heeft geconcludeerd dat het mogelijk is experimenten uit te voeren zonder theoretische kennis, kunnen we ons afvragen hoe dit het geval is in de moderne natuurkunde. Hierbij worden namelijk experimenten gedaan met theoretische entiteiten, waarbij het lastiger voor te stellen is dat de experimenten zonder voorafgaand theoretisch begrip uitgevoerd worden. Dit vraagstuk zal later in mijn scriptie nog naar voren komen.

Behalve van ervaringskennis kunnen we in natuurwetenschappelijke experimenten ook gebruik maken van fenomenologische wetten. Deze fenomenologische wetten zal ik behandelen in de volgende paragraaf.

Experimentele wetten

Een andere soort kennis uit de empirie die een belangrijke rol kan spelen in natuurwetenschappelijke experimenten, wordt uitgewerkt door Rainer Lange (Lange, 2003). Hij stelt dat empirische generalisaties een belangrijke rol spelen bij experimenten.

Lange onderscheidt in experimenten drie fasen (Lange, 2003, pp. 121-122). De eerste fase die hij definieert is de preparatiefase waarin de apparaten gebouwd worden. In de tweede fase wordt een testobject in een speciale relatie met het apparaat gebracht, waarbij de experimentele opstelling gemaakt wordt. De derde fase die hij onderscheidt, begint met de interventie van de experimentator en leidt tot dataverzameling. Hij concludeert dat, hoewel dit in de praktijk niet vaak wordt gedaan, alledrie deze fasen uitgevoerd kunnen worden op basis van puur experimentele instructies. Hierbij is er dus geen kennis nodig van de theoretische achtergrond van het experiment.

Op basis van praktijkvoorbeelden leidt Rainer Lange af dat hoewel deze materiële instructies goed genoeg zijn om een experiment uit te voeren en één of twee keer een probleem op te lossen, ze verder niet toereikend zijn voor het doel een perfecte technologie te ontwikkelen. Hij stelt dat men hiervoor op zoek moet gaan naar storende factoren en definieert dit soort experimenten als extrawetenschappelijke experimenten.

Lange concludeert dat zelfs deze extrawetenschappelijke experimenten in de praktijk vaak niet toereikend zijn voor het ontwikkelen van een perfecte technologie. Hiervoor moet volgens hem overgegaan worden tot experimentele wetenschap, waarbij men zoekt naar verklaringen van hoe en waarom storende factoren optreden. Het verschil tussen dit tweede en derde niveau ligt er volgens hem in dat op het derde niveau het principe van causaliteit aangenomen wordt. Op dit niveau worden experimentele wetten opgesteld. Als we dit toepassen op het voorbeeld van Hume van de botsende biljartballen, kan worden geconcludeerd dat er nu experimentele wetten worden opgesteld, zoals: als een biljartbal tegen een stilliggende biljartbal botst, heeft dit tot gevolg dat deze tweede bal ook in beweging komt. Storende factoren die hierbij zouden kunnen worden gevonden zijn bijvoorbeeld de weerstand van de ondergrond, zodat vervolgens een experimentele wet kan worden opgesteld waarbij de invloed van de ondergrond op de mate van rollen van de tweede biljartbal kan worden onderzocht. Lange erkent hierbij dat het idee van causaliteit in de natuurwetenschappen problematisch is (Lange, 2003, pp. 121-122). Hij stelt echter voor, dit idee van causaliteit alleen te zien als methodologisch principe, dat de onderzoekers vertelt wat ze moeten doen. Op deze manier vermijdt hij de metafysische moeilijkheden die, zoals beschreven door Hume (zie paragraaf 1.1), verbonden zijn met causaliteit.

Experimentele wetten kunnen volgens Lange dus worden gezien als een speciaal soort experimentele instructies. Deze experimentele instructies nemen in de visie van Lange een belangrijke plaats in. Ze kunnen volgens hem namelijk niet helemaal theorievrij zijn, maar ze zijn wel zo onafhankelijk mogelijk (Lange, 2003, p. 123). Hierdoor kunnen volgens Lange twee problemen worden onderscheiden: of een experiment goed is uitgevoerd en of het goed geïnterpreteerd is. Bij natuurwetenschappelijke experimenten is dit een belangrijk onderscheid, omdat het ons in staat stelt de juiste kennis uit experimenten af te leiden.

2.1.3 Modellen

Een derde soort kennis die een belangrijke rol kan spelen in natuurwetenschappelijke experimenten is kennis uit modellen (zie ook paragraaf 1.4). Zoals Morrison en Morgan stellen (Morrison & Morgan, 1999), mediëren deze modellen tussen theorie en ervaring (zie paragraaf 2.1.1 en 2.1.2). Op basis van "Models in Philosophy of Science" van Daniela Bailer-Jones (Bailer-Jones, 2004) kan worden gesteld dat modellen een aantal eigenschappen hebben:

1. Modellen gaan over empirische fenomenen
2. Modellen geven een theoretische interpretatie van empirische fenomenen. Modellen mediëren tussen theorie en fenomeen
3. Modellen gebruiken verschillende representatieve gereedschappen

4. Modellen hebben een functie
5. Modellen richten zich alleen op bepaalde eigenschappen van het fenomeen (i.e. simplificatie en abstractie)

In hoofdstuk 4 zal ik de rol van modellen in natuurkundig onderzoek verder uitwerken.

2.2 Het toepassingsgebied van de kennis

Hierboven hebben we ons beziggehouden met kennis die kan worden gebruikt bij het opzetten van experimenten. We kunnen ons ook de vraag stellen wat het toepassingsbereik is van de kennis die af te leiden is uit deze experimenten. Als we een experiment uitvoeren, kunnen we ons afvragen of de kennis die we hieruit afleiden algemeen geldig is. Verschillende filosofen hebben zich met deze vraag beziggehouden. Davis Baird zegt hierover:

“A public, regular, reliable phenomenon over which we have material mastery bears working knowledge of the world and “runs true” in this material sense of truth. (Baird, 2003, p. 55)”

Het fenomeen dat in een experiment optreedt moet volgens Baird dus publiek toegankelijk en betrouwbaar zijn om kennis op te leveren die ook buiten het experiment geldig is. Ook Rainer Lange wijdt een deel van zijn artikel aan de vraag hoe kennis uit experimenten van subjectieve kennis objectieve kennis kan worden. Hieruit blijkt dat beide filosofen het niet als vanzelfsprekend zien dat kennis uit experimenten meteen algemeen geldig wordt bevonden.

De vraag naar het toepassingsbereik van de kennis die uit experimenten kan worden afgeleid, wordt uitgewerkt door Rom Harré.

2.2.1 Het apparaat-wereldcomplex

De wetenschapsfilosofie heeft zich in de periode waarin het logicisme de wetenschapsfilosofie domineerde nauwelijks beziggehouden met de filosofische studie van wetenschappelijke experimenten (Harré, 2003, p. 21). De logicisten zagen experimentele resultaten namelijk als brute feiten, die gelijkstaan aan observaties. Rom Harré stelt in zijn artikel “The Materiality of Instruments in a Metaphysics for Experiments” (Harré, 2003) dat hierdoor de filosofische studie van experimenten, apparaten en instrumenten verwaarloosd is.

Harré’s artikel richt zich op de vraag naar de epistemologische status van de kennis die uit experimenten afgeleid kan worden. Een belangrijk begrip dat hij definieert bij het beantwoorden van deze vraag is ‘het apparaat-wereldcomplex’. Hij stelt dat in een experimentele opzet materiaal op verschillende manieren wordt geïntegreerd in de materiële wereld. Deze geïntegreerde gehelen noemt hij apparaat-wereldcomplexen.

Om de vraag naar de epistemologische status van kennis die uit experimenten afgeleid kan worden te kunnen beantwoorden, onderscheidt Harré drie soorten wetenschappelijke experimenten.

Ten eerste onderscheidt hij experimenten die in causale relatie staan met de wereld. Een voorbeeld dat hij hiervan geeft is een thermometer. Door een stijging van de temperatuur in de wereld, verandert in het instrument de hoogte

van de kwikkolom. Hierbij staat de hoogte van de kwikkolom dus in causale relatie met de temperatuur in de wereld.

De tweede categorie wetenschappelijke experimenten die Harré onderscheidt, bestaat uit experimenten die een ontologische gelijkenis vertonen met de wereld. Een voorbeeld dat hij hiervan geeft is een experiment waarbij in een laboratorium het gedrag van *Drosophila* (fruitvliegjes) bestudeerd wordt. Het laboratorium staat hierbij model voor de wereld. Het apparaat vertoont in dat opzicht een ontologische gelijkenis met de wereld.

Een derde categorie die door Harré wordt onderscheiden is de categorie van de Bohrse experimenten. Hij definieert dit soort experimenten als experimenten die noch in causale relatie staan tot de wereld, noch hier ontologische gelijkenis mee vertonen. Dit soort experimenten komt vaak voor in de moderne natuurkunde. Een voorbeeld dat Rom Harré hiervan beschrijft is de deeltjesversneller CERN, in Genève.

Harré stelt dat fysici vaak een Aristotelische visie hebben op experimenten. Deze Aristotelische visie houdt in dat we het experiment zien als een soort raam tot de wereld. Hierdoor zien natuurkundig onderzoekers kennis die we opdoen uit experimenten als kennis over de natuur, over de wereld:

“An actual phenomenon produced in an apparatus is the manifestation of a potentiality in the world. This would allow a back inference that would simply ascribe a natural propensity or potentiality for whatever occupies some region of nature in contact or causal connection with the apparatus to appear as the experimental phenomenon. This sounds as if we could say “an apparatus makes actual in the laboratory that which is potential in nature”. This still treats apparatus as a kind of *window on the world* (my italics).” (Harré, 2003, p. 31)

Uit bovenstaand citaat blijkt dat Harré geen aanhanger is van de visie waarin we een experiment zien als een soort raam tot de wereld. Hij stelt namelijk dat in deze Aristotelische visie de invloed van het apparaat op het fenomeen genegeerd wordt. Hierdoor kan in gevallen waarin de invloed van het apparaat op het fenomeen groot is ten onrechte worden geconcludeerd dat deze experimenten ons kennis over de wereld opleveren.

Als een apparaat in causale of ontologische relatie staat met de wereld, is het volgens Harré mogelijk uit deze experimenten kennis af te leiden over de wereld. In dit geval is volgens hem de invloed van het apparaat op het fenomeen klein genoeg om een Aristotelische visie hierover aan te houden. Uit de eerste en tweede soort experimenten die hij onderscheidt kunnen we volgens hem dus kennis over de wereld afleiden.

In de derde soort experimenten die hij onderscheidt, is de relatie tussen apparaat en wereld echter veel complexer. Harré stelt dat Bohrse apparaten, die in Bohrse experimenten gebruikt worden, hybride zijn: ze zijn gedeeltelijk onderdeel van de natuur en gedeeltelijk geconstrueerd. Hij stelt dat deze experimenten fenomenen creëren die niet in de natuur zouden zijn voorgekomen als het apparaat niet bestaan had. Hierdoor is kennis die wordt opgedaan uit dit soort experimenten niet geldig in de wereld, maar alleen in het apparaat-wereldcomplex.

Dit idee werkt hij uit voor het voorbeeld van de deeltjesversneller in Genève. Natuurkundig onderzoekers zijn van mening dat ze door middel van deze deeltjesversneller het W-deeltje (een ‘intermediate vector boson’, dat door natuurkundigen gezien wordt als de mediator van de zwakke interactie tussen elementaire deeltjes) hebben kunnen waarnemen. Dit komt volgens Harré omdat zij geen verschil maken tussen zijn tweede en derde categorie experimenten. Zij gaan ervan uit dat ook in het soort experimenten dat in CERN wordt gedaan, een ontologische gelijkenis bestaat tussen het laboratorium en de wereld. Harré stelt echter dat de kennis die in dit soort experimenten opgedaan geen kennis oplevert over de wereld zelf, maar alleen over het apparaat-wereldcomplex. Het ontdekte W-deeltje bestaat dus volgens de filosofie van Harré alleen binnen het apparaat-wereldcomplex en niet in de echte wereld.

In zijn artikel zegt Harré niets over de aard van de kennis die kan worden afgeleid uit deze Bohrse experimenten. Een filosoof die dit wel uitwerkt is Nancy Cartwright. Het soort apparaten dat Harré Bohrse apparaten noemt, noemt Cartwright nomologische machines. Een voorbeeld van een nomologische machine is dus de deeltjesversneller die gebruikt wordt in de Bohrse experimenten in CERN.

2.2.2 Nomologische machines

Cartwright stelt in haar filosofie van de experimentele wetenschap dat de meest fundamentele eigenschappen van de wereld niet natuurwetten maar capaciteiten zijn (Cartwright, 1989). Zij stelt dat objecten bepaalde capaciteiten bezitten, oftewel bepaalde “abilities, tendencies and propensities to do” (Cartwright, 1999, p. 64). Hierbij stelt ze dat we niet, zoals in de Humeaanse traditie, moeten denken in termen van algemene wetten, maar zoals in de Aristotelische traditie in termen van ‘natures’. Een voorbeeld dat ze aandraagt is de observatie dat twee in de ruimte gescheiden massa’s ‘elkaar aantrekken’. Zij stelt dat we niet moeten denken in termen van de wet van Newton, $F = m * a$, maar in termen van dat het in de natuur van twee in de ruimte gescheiden massa’s ligt elkaar aan te trekken, oftewel dat ze de capaciteit bezitten elkaar aan te trekken.

Een reden waarom Cartwright van mening is dat we moeten denken in termen van capaciteiten is dat capaciteiten, in tegenstelling tot natuurwetten, volgens haar gezien kunnen worden als universeel geldig. In haar filosofie werkt Cartwright uit dat natuurwetten alleen geldig zijn als ze binnen een bepaald model van de theorie passen. Een voorbeeld dat ze hierbij noemt is de harmonische oscillator, dat een model is voor de theorie van Newton. Een natuurwet is dus volgens haar alleen *ceteris paribus* geldig: alleen als aan de condities van het model voldaan wordt. Cartwright werkt uit dat dit in de natuur vrijwel nooit voor blijkt te komen. Ze stelt dat er wel een klein aantal uitzonderingen hierop is. Een voorbeeld dat ze hiervan geeft is het zonnestelsel dat volgens de wetten van Newton en Kepler functioneert.

Een model is altijd een versimpeling van de werkelijkheid. Sommige factoren worden buiten beschouwing gelaten omdat ze verwaarloosbaar zijn; andere omdat ze controleerbaar zijn. Daarom stelt Cartwright dat alleen aan de condities van een model voldaan kan worden als in een specifieke, gecontroleerde omgeving

gewerkt wordt. Deze gecontroleerde omgeving wordt volgens haar gecreëerd in een nomologische machine. Cartwright definieert een nomologische machine als:

“a fixed (enough) arrangement of components, or factors, with stable (enough) capacities that in the right sort of stable (enough) environment will, with repeated operation, give rise to the kind of regular behaviour that we represent in our scientific laws.” (Cartwright, 1999, p. 50)

In een nomologische machine wordt dus volgens Cartwright een stabiele omgeving gecreëerd, waaruit het regelmatige gedrag van onze wetenschappelijke wetten afgeleid kan worden. Volgens Cartwright bestaan natuurwetten dus niet in de wereld, maar alleen binnen een nomologische machine.

Uit bovenstaande is te concluderen dat de filosofie van Cartwright verder gaat waar die van Harré ophoudt. Harré stelt dat de kennis die we kunnen afleiden uit Bohrse experimenten alleen geldig is binnen het apparaat-wereldcomplex. Cartwright stelt dat de algemene wetten die uit dit soort experimenten worden afgeleid inderdaad alleen geldig zijn binnen dit apparaat-wereldcomplex. De basiseigenschappen van de wereld kunnen volgens haar echter niet worden weergegeven door wetten, maar alleen door capaciteiten. De kennis over capaciteiten die we opdoen uit Bohrse experimenten, oftewel experimenten met nomologische machines, kunnen volgens haar filosofie wél buiten het apparaat-wereldcomplex geplaatst worden. Deze kennis van capaciteiten leidt dus wel tot kennis over de wereld.

Bovenstaande uiteenzetting van de filosofie van Cartwright leidt ons tot de volgende paragraaf. In deze paragraaf zal ik visies behandelen over kennis die wel toepasbaar is op de wereld.

2.2.3 Kennis die toepasbaar is op de wereld

De vraag in hoeverre kennis die kan worden afgeleid uit experimenten toepasbaar is op de wereld, hangt nauw samen met de vragen waar men zich op concentreert in het wetenschappelijk realisme/antirealismedebat. In dit debat vraagt men zich af in hoeverre natuurwetenschappelijke kennis ware kennis over de wereld is. Bestaan theoretische entiteiten zoals elektronen bijvoorbeeld? En moeten we geloven in de algemene geldigheid van een wet?

In dit realisme/antirealismedebat zijn veel verschillende standpunten te onderscheiden. Zoals James Ladyman in ‘Understanding Philosophy of Science’ uitwerkt, kunnen er vijf verschillende condities onderscheiden waaraan wetenschappelijk realisme moet voldoen:

- (i) The entities or kinds of entities talked about and/or described by discourse about S exist;
- (ii) their existence is independent of our knowledge and minds.
- (iii) Statements about S are irreducible/ineliminable and are genuinely *assertoric* expressions;
- (iv) truth conditions for statements of S are objective and determine the truth or falsity of those statements depending on how things stand in the world.

- (v) Truths about S are knowable and we do in fact know some of them, and hence the terms of S successfully refer to things in the world. (Ladyman, 2002, p. 158)

De eerste twee condities zijn de metafysische condities; de derde en de vierde zijn de semantische condities; de vijfde is de epistemische conditie. Een antirealist over de natuurwetenschappen hoeft maar een van deze condities te verwerpen. Voor iedere conditie zijn er verschillende redenen te vinden om deze te verwerpen, waardoor er veel verschillende soorten antirealisme bestaan. Om realistisch over de natuurwetenschappen te zijn, is het dus noodzakelijk het eens te zijn met alle vijf de condities. Hiertoe is het noodzakelijk een visie aan te hangen die ervan uitgaat dat de wereld zo is zoals wij haar waarnemen. In de praktijk blijken we echter in verschillende omstandigheden dezelfde objecten anders waar te nemen. Om deze reden wordt de visie waarin alle vijf de condities aangehangen worden vaak naïef realisme genoemd.

Als we echter naar het natuurwetenschappelijke praktijk kijken, lijken we intuïtief een bepaalde mate van wetenschappelijk realisme nodig te hebben. In de natuurwetenschappen worden experimenten namelijk uitgevoerd met als doel het testen van theorieën en modellen aan de werkelijkheid. Als we hierbij niet in bepaalde mate een realistische visie aannemen, is dit testen onmogelijk en zijn experimenten overbodig.

Ian Hacking (Hacking, 1983) heeft het idee van wetenschappelijk realisme verder uitgewerkt. Hierin heeft hij twee meer geavanceerde noties van realisme uitgewerkt die niet kunnen worden gezien als naïef wetenschappelijk realisme: realisme over theorieën en realisme over entiteiten.

Realisme over theorieën houdt in dat men van mening is dat theorieën een ware beschrijving van de wereld kunnen geven. Hierbij heeft wetenschap dus het doel te beschrijven hoe de wereld echt is. Dit staat in contrast met wetenschappelijk antirealisme, dat stelt dat theorieën hooguit adequaat kunnen zijn of handig om mee te werken, maar niet de echte wereld kunnen beschrijven (Hacking, 1983, pp. 27-28). Een aanname die realisme over theorieën maakt is dat de wereld unificeerbaar is: Ze is te beschrijven met één of hooguit een aantal theoretische wetten.

Hacking zelf hangt een tweede soort wetenschappelijk realisme aan: realisme over entiteiten. Zijn visie werkt hij uit in zijn boek 'Representing and intervening' (Hacking, 1983). Hij stelt dat we op het moment dat we theoretische entiteiten kunnen manipuleren, kunnen concluderen dat deze entiteiten echt bestaan. Een voorbeeld dat hij hiervan aandraagt is dat van het elektron. Op het moment dat het elektron theoretisch gepostuleerd werd, kon er nog niets gezegd worden over zijn realiteit. Zelfs toen bleek dat door het postulaat van het bestaan van elektronen veel fenomenen te verklaren waren, was dit niet voldoende bewijs voor het bestaan van het elektron. Een volgende stap was het bepalen van bijvoorbeeld de massa en de lading van het elektron. Dat dit mogelijk was bracht ons dichterbij de mogelijke conclusie dat elektronen echt bestaan. Maar pas toen het mogelijk werd in experimentele opstellingen elektronen te schieten, konden we de realiteit van elektronen concluderen:

"So far as I'm concerned, if you can spray them then they are real"
(Hacking, 1983, p. 23)

"The best kinds of evidence for the reality of a postulated or inferred entity is that we can begin to measure it or otherwise understand its causal powers. The best evidence, in turn, that we have this kind of understanding is that we can set out, from scratch, to build machines that will work fairly reliably, taking advantage of this or that causal nexus. Hence, engineering, not theorizing, is the best proof of scientific realism about entities." (Hacking, 1983, p. 274)

Met deze visie legde Hacking dus sterke nadruk op experimenten. Deze experimenten zijn in zijn filosofie essentieel voor het beslissen of we al dan niet realistisch naar theoretische entiteiten moeten kijken.

Ook Nancy Cartwright is een realist over entiteiten en een antirealist over theorieën. Zij stelt dat we in een 'dappled world' leven, die beschreven kan worden door veel verschillende fenomenologische wetten (Cartwright, 1999). Het is in haar visie echter niet mogelijk de wereld te beschrijven door middel van een klein aantal theoretische, universele wetten. Theoretische wetten gelden volgens haar alleen *ceteris paribus*: alleen onder bepaalde, gecontroleerde omstandigheden.

Cartwright werkt in haar 'How the Laws of Physics Lie' (Cartwright, 1983) een specifieke vorm van realisme over entiteiten uit. In dit boek stelt ze dat niet alle eigenschappen die een rol spelen in theorie, daadwerkelijk bestaan:

"Not all predicates that play a significant role in a theory pick out properties that are real for that theory. Many, for example, represent only properties in models, characteristics that allow the derivation of sound phenomenological laws, but which themselves play no role in the causal processes described by those laws." (Cartwright, 1983, p. 202)

Sommige eigenschappen representeren volgens haar dus alleen eigenschappen in bijvoorbeeld modellen en bestaan niet in de echte wereld. Cartwright werkt vervolgens uit dat causaliteit ons kan helpen bij het bepalen welke eigenschappen reëel zijn en welke niet. Hierbij moet volgens haar gekeken worden naar causale effecten die bepaalde eigenschappen in de wereld kunnen hebben.

Een voorbeeld dat ze hiervan geeft is de positie van een gebonden elektron (Cartwright, 1983, pp. 181-182). Het kennen van de positie van een elektron geeft ons namelijk geen enkele kennis over de toekomstige plaats van het elektron. Bovendien heeft het feit dat het elektron zich op die positie bevindt geen enkel fysisch gevolg. Een eigenschap die wel causale effecten heeft is een energieovergang. Als een elektron van de ene naar de andere energiebaan 'springt', heeft dit effect op bijvoorbeeld de spectraallijnen van het atoom. Ze pleit er dan ook voor te kijken naar overgangswaarschijnlijkheden in plaats van naar bijvoorbeeld positiewaarschijnlijkheden. Deze eerste zijn volgens haar namelijk reëler dan de tweede.

Met deze visie werkt Nancy Cartwright een specifieke vorm van realisme over entiteiten uit. Hierbij kan van bepaalde eigenschappen van deze entiteiten via causaliteit worden vastgesteld dat ze reëel zijn. Er kan volgens haar visie dus geen conclusie worden getrokken over of entiteiten reëel zijn, maar wel over of er entiteiten bestaan met bepaalde reële eigenschappen. Deze eigenschappen

noemt ze capaciteiten. Wat ze hier precies onder verstaat heb ik uitgewerkt in paragraaf 2.2.2.

Zoals ook in sectie 2.2.2 te vinden is, stelt Cartwright dat veel wetenschappelijke experimenten onder heel specifieke, gecontroleerde omstandigheden uitgevoerd worden: binnen een nomologische machine. Ze stelt dat veel kennis die we uit experimenten kunnen afleiden alleen geldig is binnen deze nomologische machine. Een belangrijke soort kennis die volgens haar alleen geldig is binnen deze nomologische machine wordt gevormd door theorieën. Deze theorieën gelden alleen *ceteris paribus*: alleen onder heel specifieke omstandigheden die in de nomologische machine gecreëerd worden. Om deze reden zijn ze niet geldig in de wereld buiten de nomologische machine.

Uit bovenstaande kunnen we dus concluderen dat Cartwright, net als Hacking, wel realist is over entiteiten, maar niet over theorieën.

Bij het uitvoeren van experimenten, is de vraag naar het toepassingsbereik van de verschillende soorten kennis die uit deze natuurwetenschappelijke experimenten af te leiden is essentieel. De natuurwetenschap heeft tot doel kennis over de wereld te vergaren en dus is het belangrijk dat zij weet hoe ze kennis over de wereld kan verkrijgen.

Hoofdstuk 3

Kwantummechanica: theorie en experiment

In dit hoofdstuk zal ik het onderzoek waar ik me bij mijn bacheloronderzoek voor technische natuurkunde mee bezig heb gehouden beschrijven. Hiervoor zal ik eerst een beschrijving geven van de ontwikkelingen in de kwantummechanica en van hoe men is gekomen tot de theoretische voorspelling van entanglement. Daarna zal ik beschrijven hoe experimenten waarin wordt getest of entanglement optreedt bij elektronen kunnen worden opgezet.

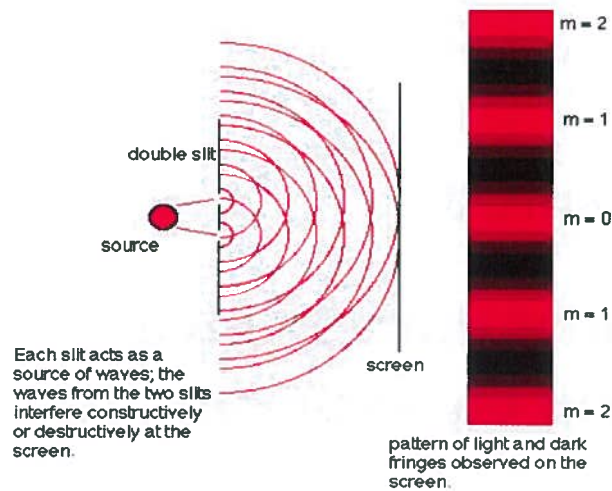
3.1 Youngs experiment - ontwikkeling van de kwantummechanica

Aan het begin van de 20^e eeuw werd een nieuwe fysische theorie ontwikkeld, de kwantummechanica. Deze theorie bevat veel intuïtief onbegrijpelijke elementen. Hieronder zal ik deze elementen behandelen aan de hand van Youngs experiment. Dit experiment, dat inmiddels in veel vormen is uitgevoerd, illustreert de intuïtief onbegrijpelijke theoretische en experimentele resultaten van de kwantummechanica.

3.1.1 Licht: deeltje of golf?

Rond de 19^e eeuw was een van de belangrijkste vragen waar men zich in de natuurkunde mee bezig hield de vraag of licht uit deeltjes of uit golven bestaat. Men probeerde een antwoord op deze vraag te krijgen middels cruciale experimenten. Er zijn echter twee experimenten die beide een ander antwoord op bovenstaande vraag opleveren. Hieronder zal ik deze experimenten behandelen.

Het eerste experiment werd in eerste instantie uitgevoerd door Thomas Young rond 1805. Dit experiment werd later bekend onder de naam dubbelspleetexperiment of Youngs experiment. In dit experiment werd gebruik gemaakt van een scherm met twee spleten erin. Op dit scherm werd licht geschenen. Vervolgens werd het licht dat door de twee spleten was gegaan zichtbaar gemaakt



Figuur 3.1: Bron: <http://buphy.bu.edu/duffy/PY106/26a.GIF>

met behulp van een detectiescherm. Als licht uit deeltjes bestond, zouden we verwachten dat op het scherm twee lichtpunten zichtbaar worden, precies op de plaats waar het licht dat door de spleten gaat het scherm raakt. Als licht uit golven bestond, zouden we verwachten een interferentiepatroon te zien. Een voorbeeld van zo'n interferentiepatroon is te vinden in figuur 3.1.

Bij uitvoering van Youngs experiment bleek dat er een interferentiepatroon op het scherm waar te nemen was. Hierdoor werd door fysici op dat moment geconcludeerd dat licht bestaat uit golven. De vraag naar het golf- of deeltjeskarakter van licht bleek echter nog niet opgelost: een paar decennia later werd een experiment uitgevoerd waarin de deeltjeseigenschappen van licht naar voren kwamen.

In 1839 werd door Alexandre Edmond Becquerel voor het eerst het foto-elektrisch effect waargenomen. Dit effect houdt fysisch in dat als een metallisch oppervlak blootgesteld wordt aan elektromagnetische straling, er een stroom vrijkomt. Dit experiment heeft een nieuwe dimensie gegeven aan de vraag of licht uit deeltjes of uit golven bestaat. Binnen een fysisch deeltjesmodel is dit effect namelijk te interpreteren als lichtdeeltjes die er door botsing voor zorgen dat elektronen geëmitteerd worden uit het metaal. Maar het bleek onmogelijk het foto-elektrisch effect te begrijpen in termen van een fysisch golfmodel. De energie van de uitgezonden elektronen bleek namelijk niet af te hangen van de intensiteit van de inkomende straling.

Uit bovenstaande twee experimenten blijkt dat er geen eenduidig antwoord gegeven kan worden op de vraag of licht bestaat uit deeltjes of uit golven. Het lijkt zowel deeltjes- als golfeigenschappen te bezitten. Het antwoord op de vraag die fysici lange tijd heeft beziggehouden, lijkt dus te zijn dat licht zich zowel als deeltje als als golf kan gedragen, afhankelijk van de situatie die wordt be-

studeerd. Dit blijkt niet de enige opmerkelijke conclusie die uit experimenten met licht kan worden getrokken. Hieronder zal ik een aantal uitbreidingen op Youngs experiment bespreken die dit verder illustreren.

3.1.2 Uitbreidingen van Youngs experiment: waarschijnlijkheid, superpositie en metingen

In de 19^e en 20^e eeuw is Youngs experiment op een aantal punten uitgebreid. Dit werd gedaan vanuit het licht van nieuwe theoretische ontwikkelingen op het gebied van de kwantummechanica.

In de 20^e eeuw, heeft Max Planck zijn kwantumhypothese uitgewerkt. Licht bestaat volgens deze hypothese uit lichtkwanta, fotonen, die allemaal een specifieke, gekwantiseerde energie hebben. Dit betekent niet per se dat licht uit deeltjes bestaat. Er werd namelijk ook gesteld dat ieder foton een bepaalde golflengte heeft en dus ook golfeigenschappen bezit. Deze kwantumhypothese was de eerste stap op weg naar de ontwikkeling van de kwantummechanica.

Volgens deze theorie van een gekwantiseerde microwereld zou het dus ook mogelijk moeten zijn Youngs experiment uit te voeren met één lichtkwantum om te zien of ook in dit geval een interferentiepatroon zichtbaar zou worden op het detectiescherm.

Experimenteel was het niet mogelijk om één lichtkwantum uit te zenden, maar deze situatie was wel te benaderen. Zoals beschreven wordt door Peter Rodgers in zijn artikel over het dubbelspleetexperiment in *Physics World* (Rodgers, 2002), werd dit gedaan door Geoffrey Ingram Taylor in 1909. Taylor voerde Youngs experiment uit met zo weinig licht dat het vergelijkbaar is met licht van een kaars die net iets meer dan een mijl verderop brandt. Zelfs in dit geval was een interferentiepatroon waar te nemen.¹ Paul Dirac trok uit dit experiment een beroemde conclusie: ieder foton kan met zichzelf interfereren.

In een tweede uitbreiding van Youngs experiment is gekeken naar de gevolgen van het plaatsen van een lichtdetector in één of beide spleten. Als de detector aangezet wordt, blijkt dat het interferentiepatroon niet meer zichtbaar is op het scherm. Het foton lijkt nu niet meer met zichzelf te interfereren, maar gaat of door de ene of door de andere spleet. Het vertoont dus nu geen golf- maar deeltjesgedrag.

Op het moment dat een detector geplaatst maar niet aangezet wordt, blijkt het interferentiepatroon wel zichtbaar te zijn. Het lijkt dus alsof het foton 'weet' wanneer de detector aanstaat of niet. Men heeft geprobeerd dit fenomeen beter te begrijpen door verdere experimenten. Zo heeft men bijvoorbeeld een experiment uitgevoerd waarbij pas nádat het foton uitgezonden was de detector geplaatst werd. Ook heeft men een systeem gemaakt dat willekeurig de detector aan of uit zet. In al deze experimenten bleek dat als de detector uit stond, een interferentiepatroon zichtbaar werd; als de detector aan stond, werden twee lichtpunten op het detectiescherm waargenomen.

¹Formeel gesproken zien we, in het geval dat één foton wordt uitgezonden, een punt op het scherm. Als heel vaak één foton wordt uitgezonden, wordt het interferentiepatroon zichtbaar (Tonomura *et al.*, 1989).

3.2 Kwantummechanische theorie

De uitkomsten van de hierboven beschreven experimenten lijken erg tegenintuïtief. Opmerkelijk is, dat hoewel de uitkomsten van de experimenten tegenintuïtief zijn, ze wel in overeenstemming zijn met de voorspellingen die de kwantummechanische theorie doet. Deze theorie is aan het begin van de 20^e eeuw ontwikkeld. Haar basisveronderstelling is dat energie gekwantiseerd is en dat de toestand van een systeem als functie van de tijd te beschrijven is met behulp van een golfvergelijking die voldoet aan de Schrödingervergelijking. Deze golfvergelijking heeft binnen het kwantummechanische model geen fysische betekenis; haar kwadraat heeft dit wel. Het kwadraat van de golf functie geeft hierbij de waarschijnlijkheid weer dat een deeltje zich in een bepaalde toestand bevindt. In de wereld die beschreven wordt door de kwantummechanica kan namelijk niets met zekerheid gebeuren en speelt toeval een belangrijke rol. Welke van twee mogelijke gebeurtenissen zal plaatsvinden is dus niet te voorspellen. Zoals Marc Lange het in zijn boek ‘An introduction to the philosophy of physics’ (Lange, 2002) beschrijft:

“When Jones develops lung cancer and Smith does not, we expect there to be a reason for the difference: say, that Jones was a heavy smoker and Smith never smoked. But QM governs a carcinogen’s interaction with DNA, resulting ultimately in cancer. So if QM is complete, there may be no difference whatsoever between Jones and Smith to account for their different outcomes. In principle, Jones and Smith could have been *exactly alike* in all of their risk factors, genetic and environmental - even in those risk factors that we have not yet discovered. Jones was simply unlucky. (Lange, 2002, pp. 258-259)”

Lange concludeert dus dat volgens de kwantummechanica twee personen precies gelijk kunnen zijn in hun risicofactoren, maar dat het alsnog mogelijk is dat de ene persoon kanker krijgt terwijl de ander dit niet krijgt. Dit is een opmerkelijke conclusie. Het betekent dat veel dingen in de microwereld simpelweg niet te verklaren zijn omdat ze door toeval bepaald worden.

Een andere belangrijke voorspelling van de kwantummechanische theorie is dat een deeltje zich vóóordat een meting op het systeem wordt uitgevoerd², niet in een specifieke toestand bevindt. Ze bevindt zich op dat moment in een superpositie van alle mogelijke toestanden waarin ze zich kan bevinden, weergegeven door een genormaliseerde golfvergelijking. Een voorbeeld hiervan is te vinden in het dubbelspleetexperiment. Hierbij kan het foton of door de bovenste of door de onderste spleet gaan. Als er dus geen (werkende) meetapparatuur geplaatst is, bevindt het foton zich in een superpositie van deze toestanden:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{bovenste}\rangle \pm |\text{onderste}\rangle) \quad (3.1)$$

Hierbij is $1/\sqrt{2}$ alleen een normalisatieconstante. Deze normalisatieconstante heeft tot doel de totale waarschijnlijkheid op 1 te schalen. $|\rangle$ is de fysische

²Bij meting vindt een zogenaamde ‘collapse of the wave function’ plaats. Hier zal ik op terugkomen in paragraaf 3.3

notatie voor een toestand. $|onderste\rangle$ betekent dus dat het elektron door de onderste spleet gaat; $|bovenste\rangle$ betekent dat het elektron door de bovenste spleet gaat.

Theoretisch wordt dus voorspeld dat het foton zich in een superpositie zal bevinden waarbij het zowel door de ene als door de andere spleet gaat. Dit is te interpreteren via een fysisch model, waarbij we het foton zien als een golf. Hierbij kan het door beide spleten tegelijk gaan en vervolgens met zichzelf interfereren. Zoals ik heb beschreven in paragraaf 3.1 blijkt dat er inderdaad een interferentiepatroon zichtbaar wordt. De tegenintuïtieve experimentele resultaten blijken dus goed in overeenstemming te zijn met de theorie.

3.3 Entanglement: causaliteit en lokaliteit

Hoewel Albert Einstein belangrijke bijdragen heeft geleverd aan de ontwikkeling van de theorie van de kwantummechanica, was hij het nooit eens met de metafysische interpretaties hiervan. Hij was van mening dat kwantummechanische theorie een juiste, maar onvolledige beschrijving gaf van de werkelijkheid. Volgens hem kon de wereld niet gebaseerd zijn op waarschijnlijkheden en moesten er verborgen variabelen zijn die de theorie compleet zouden maken. Met het vinden van deze variabelen zou volgens hem blijken dat de kwantummechanische theorie en hiermee de microwereld niet probabilistisch van aard is.

Einstein heeft over deze (on)volledigheid van de kwantummechanica veel discussies gevoerd met Niels Bohr. Einstein droeg hierbij telkens argumenten aan waarom de kwantummechanische beschrijving van de werkelijkheid niet volledig kon zijn. Bohr kon de problemen die Einstein aandroeg echter altijd oplossen. Totdat Einstein uitwerkte dat uit de kwantummechanische theorie het principe van entanglement volgt.

Entanglement houdt in dat twee of meer deeltjes zich samen in een superpositie van de voor hen mogelijke toestanden bevinden. Doordat de deeltjes zich samen in één toestand bevinden, zijn ze met elkaar verbonden en is de toestand van het ene deeltje afhankelijk van de toestand van het andere deeltje. Een meting van de toestand van een deeltje levert niet de superpositie als resultaat, maar één van de mogelijke toestanden van de superpositie. Fysici omschrijven wat gebeurt bij metingen vaak als een ‘collapse of the wave function’. De golf-functie was namelijk voor meting een superpositie van toestanden, maar vervalt bij meting tot één van de mogelijke toestanden. Entanglement is een gevolg van het principe van superpositie als het wordt toegepast op meerdere deeltjes. Het heeft belangrijke fysische implicaties. Deze zal ik beschrijven aan de hand van een voorbeeld.

In dit voorbeeld zullen we twee entangled elektronen bestuderen. Eén van de eigenschappen van elektronen is dat ze in verschillende richtingen een spin hebben. Deze spin kan in iedere richting up of down zijn. Een heuristisch model hiervoor is dat het elektron in die richting rechtsom of linksom draait. Als we de spin van twee elektronen in de x-richting bekijken kunnen we concluderen dat er logischerwijs vier mogelijke combinaties zijn:

1. Elektron 1 en 2 hebben beide spin up

2. Elektron 1 en 2 hebben beide spin down
3. Elektron 1 heeft spin up en elektron 2 heeft spin down
4. Elektron 1 heeft spin down en elektron 2 heeft spin up

Volgens het uitsluitingsbeginsel van Wolfgang Pauli kunnen twee deeltjes zich binnen eenzelfde energieniveau niet in dezelfde toestand bevinden. Om deze reden zijn bij twee elektronen in dezelfde energietoestand opties 1 en 2 fysisch heel onwaarschijnlijk en is hun bijdrage verwaarloosbaar. Opties 3 en 4 zijn daarom bij verwaarlozing van opties 1 en 2 de enige twee fysisch mogelijke toestanden. Dit leidt tot de volgende superpositie, die ook wel de ‘singlet state’ wordt genoemd:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \quad (3.2)$$

Als van het eerste elektron de spin in de x-richting wordt gemeten, blijkt het zich door de ‘collapse of the wave function’ niet meer in een superpositie van toestanden te bevinden, maar in de toestand spin up of in de toestand spin down. Hierdoor bevindt ook het tweede elektron zich niet meer in de gezamenlijke superpositie. Een meting die wordt uitgevoerd op het eerste elektron beïnvloedt dus de toestand van het tweede elektron.

Als we het geval bestuderen van twee entanglede elektronen die in de ruimte gescheiden zijn, levert dit opmerkelijke conclusies op. De theorie voorspelt namelijk dat door de ‘collapse of the wave function’ een meting op het eerste elektron *instantaan* de toestand van het tweede elektron beïnvloedt. Dit levert een schending op van het principe van causaliteit wat ik hieronder zal uitwerken.

3.3.1 Causaliteit en lokaliteit

In de natuurkunde lijkt causaliteit een belangrijke rol te spelen. Zoals David Hume heeft aangegeven zijn er twee belangrijke eigenschappen van causaliteit: opeenvolgendheid in tijd en verbondenheid in ruimte. Op het eerste gezicht lijken krachten als de gravitatie- en Coulombkracht niet te voldoen aan het principe van causaliteit. De reden hiervoor is dat de twee objecten die elkaar aantrekken of afstoten in de ruimte van elkaar gescheiden zijn. In de natuurkunde gaat men er echter van uit dat deze krachten worden gemedieerd door een deeltje. In het geval van de Coulombkracht is dit het foton; in het geval van de gravitatiekracht is dit het graviton (Griffiths, 1987, p. 55). Deze mediërende deeltjes verbinden de twee elkaar aantrekkende of afstotende objecten, waardoor de kracht voldoet aan het principe van causaliteit. Iedere kracht heeft zo’n mediërend deeltje.

In 1905 introduceerde Albert Einstein het principe van relativiteit. Hij stelde hierbij dat het niet mogelijk is dat een deeltje een snelheid heeft die groter is dan de snelheid van het licht. Dit principe van relativiteit legt een restrictie op aan de krachten die ik hierboven heb beschreven: de mediërende deeltjes kunnen zich namelijk niet met een snelheid groter dan de lichtsnelheid voortbewegen.

Dit principe van relativiteit leidt ertoe dat men in de natuurkunde heeft geconcludeerd dat twee deeltjes die in de ruimte van elkaar gescheiden zijn, niet *instantaan* op elkaar kunnen reageren, omdat er een deeltje nodig is dat

informatie van de een naar de ander kan overbrengen. Dit deeltje moet zich gedragen volgens de wetten van de relativiteitstheorie. Hieruit krijgen we een vernieuwd beeld van causaliteit. Er kan namelijk een extra restrictie worden opgelegd aan de voorwaarde, geformuleerd door David Hume, dat het gevolg in de tijd moet volgen op de oorzaak. Deze restrictie is als volgt:

$$t \geq \frac{x}{c} \quad (3.3)$$

Hierbij is t is de tijd tussen oorzaak en gevolg; x is de afstand tussen de twee objecten; c is de lichtsnelheid (in vacuüm heeft deze de waarde $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

Dit vernieuwde causaliteitsprincipe gaat in alle ons bekende gevallen op, behalve bij entanglement. Theoretisch wordt voorspeld dat door de 'collapse of the wave function' het tweede deeltje *instantaan* reageert op een meting op het eerste deeltje. Einstein noemde dit 'spooky action at a distance' en non-lokaliteit. Deze schending van lokaliteit is het argument dat hij aandroeg tegen het theoretisch voorspelde principe van entanglement.

Entanglement is één van de meest bediscussieerde voorspellingen geworden van de kwantummechanische theorie. De uitwerking van hoe entanglement uit de theorie volgt, is in mei 1935 in *Physical Review* gepubliceerd door Einstein, Podolsky en Rosen (Einstein *et al.*, 1935). Het is geschreven in de vorm van een paradox: als de kwantummechanica een volledige beschrijving van de werkelijkheid is, is entanglement een eigenschap van de microwereld. Maar het lijkt onwaarschijnlijk dat entanglement een eigenschap van onze microwereld kan zijn, omdat het tegen ons principe van causaliteit in gaat. Om deze reden staat het EPR-paper ook wel bekend als de EPR-paradox.

Bohr was niet in staat Einsteins argument dat entanglement een consequentie is van de kwantummechanische theorie te weerleggen. Óf entanglement is een intrinsieke eigenschap van de kwantummechanische wereld, óf kwantummechanica is inderdaad geen volledige beschrijving van de werkelijkheid. De eerste optie leek intuïtief zo onwaarschijnlijk dat ze voor velen een niet te aanvaarden mogelijkheid was. Aan de andere kant kwam de kwantummechanische theorie goed overeen met experimentele resultaten en wees dit erop dat de theorie wel een goede beschrijving van de werkelijkheid gaf. De EPR-paradox is een van de meest bediscussieerde onderwerpen in de moderne natuurkunde.

3.4 Interpretaties van de kwantummechanica

3.4.1 Grondprincipe

Filosofen en natuurkundigen zijn sinds de acceptatie van de uitkomsten van de hierboven beschreven experimenten op zoek naar modellen en interpretaties die deze uitkomsten intuïtief begrijpelijk kunnen maken. Dit heeft veel filosofische discussie opgeleverd, maar een alomvattende interpretatie van de kwantummechanica is nog niet gevonden.

Anton Zeilinger (Zeilinger, 1999, 1996) heeft de pogingen om een interpretatie van de kwantummechanica te vinden nader bestudeerd. Volgens hem is het feit dat de experimenten en theorie tegenintuïtieve resultaten hebben niet de enige reden dat de kwantummechanica filosofisch zoveel bestudeerd wordt. De

relativiteitstheorie bijvoorbeeld, heeft ook componenten die tegen onze alledaagse ervaring ingaan, maar wordt filosofisch lang niet zo uitgebreid bediscussieerd. Zeilinger werkt uit, dat dit verschil volgens hem te maken heeft met het verschil dat de relativiteitstheorie wel een grondprincipe heeft, in tegenstelling tot de kwantummechanica. Een grondprincipe definieert hij hierbij als een grondlegend conceptueel principe waarop de theorie gebaseerd is. Zo geeft hij aan dat de speciale relativiteitstheorie als grondprincipe het principe van relativiteit heeft:

“... all laws must be the same in all inertial reference frames, independent of their state of relative motion” (Zeilinger, 1999, p. 632)

Het grondprincipe van de algemene relativiteitstheorie is volgens hem het principe van equivalentie:

“In a gravitational field (of small spatial extension), things behave as they do in a space free of gravitation, if one introduces, in place an “inertial system,” a reference system that is accelerated relative to an inertial system” (Zeilinger, 1999, p. 632)

Een grondprincipe zoals Zeilinger dit definieert, kan worden vergeleken met een ontologisch principe. De fundamentele wetten en principes zoals ik deze heb behandeld in paragraaf 2.1.1, worden uit dit grondprincipe afgeleid. Het ontologische principe is een metafysische vooronderstelling die niet empirisch getest kan worden. Om deze reden is het niet mogelijk het grondprincipe van een theorie te bewijzen.

In tegenstelling tot de relativiteitstheorie heeft de kwantummechanica geen algemeen geaccepteerd grondprincipe. Er zijn door onder anderen Anton Zeilinger voorstellen gedaan voor een grondprincipe van de kwantummechanica. In de wetenschappelijke wereld is er echter nog geen overeenstemming over een specifiek grondprincipe van de kwantummechanica.

Dit ontbreken van een grondprincipe kan dus een belangrijke reden zijn waarom er zoveel filosofische discussie is over de interpretatie van de kwantummechanica. Hieronder zal ik een klassificatie van de verschillende soorten interpretaties geven.

3.4.2 Verschillende interpretaties

Er zijn in de loop van de 20^e eeuw veel pogingen ondernomen een fysische interpretatie te ontwikkelen van de kwantummechanica. De meest invloedrijke hiervan is de Kopenhagen interpretatie. De Kopenhagen interpretatie was de eerste poging die werd ondernomen om een interpretatie op te stellen van de kwantummechanica (Faye, 2002). De belangrijkste grondlegger van deze interpretatie was Niels Bohr, maar ook Werner Heisenberg, Max Born e.a. hebben hier bijdragen aan geleverd. Bohr en Heisenberg hadden beide een eigen visie op de interpretatie van de kwantummechanica en hun denkbeelden kwamen niet altijd overeen. Toch wordt voor hun gezamenlijke visie vaak de term Kopenhageninterpretatie gebruikt. Deze term is ervan afgeleid dat beide aan het Niels Bohr-instituut in Kopenhagen werkten en hier uitgebreide discussies voerden over de interpretatie van de kwantummechanica. Zelf hebben ze overigens nooit de term Kopenhageninterpretatie gebruikt.

In de Kopenhageninterpretatie (Wikipedia, 2005b,c) gaat men ervan uit dat er twee processen zijn die de golffunctie beïnvloeden: de evolutie volgens de Schrödingervergelijking en het proces van metingen. Bij meting vindt een zogenaamde 'collapse of the wave function' plaats. Omdat het proces van de 'collapse of the wave function' een proces is dat is gebaseerd op waarschijnlijkheden, kunnen metingen worden gezien als fundamenteel indeterministisch. Er zijn verschillende stromingen binnen de Kopenhagen interpretatie. Hierbij wordt er soms vanuit gegaan dat de golfvergelijking een element van de realiteit is en soms dat het alleen een instrument is om waarschijnlijkheden te berekenen.

In de Kopenhageninterpretatie worden vragen als: 'waar bevond het deeltje zich voor meting?' afgedaan als betekenisloos en niet-fysisch. Metingen spelen in deze interpretatie dus een belangrijke rol, waarbij natuurkunde wordt gezien als de wetenschap van de uitkomsten van metingen. Speculaties die verder gaan dan dit punt, zijn volgens de Kopenhageninterpretatie betekenisloos.

De Kopenhagen interpretatie heeft veel invloed gehad in de natuurkunde en wordt door veel fysici aangehangen. Marc Lange geeft in zijn boek 'The philosophy of physics, Locality, Fields, Energy, and Mass' (Lange, 2002) een citaat van Sir Rudolf Peierls waaruit blijkt dat voor veel fysici de Kopenhagen interpretatie de belangrijkste interpretatie is. Sir Rudolf Peierls stelt in dit citaat zelfs dat alleen van deze interpretatie wordt afgeweken door mensen die niet gelukkig zijn met de kwantummechanica. Volgens hem kunnen we net zo goed het voorvoegsel 'Kopenhagen' weglaten, omdat het gewoon dé interpretatie van de kwantummechanica is:

Sir Rudolf Peierls (1907-1995): "I object to the term Copenhagen interpretation [because] this sounds as if there were several interpretations of quantum mechanics. There is only one. There is only the way in which you can understand quantum mechanics. There are a number of people who are unhappy about this, and are trying to find something else. But nobody has found anything else which is consistent yet, so when you refer to the Copenhagen interpretation of the mechanics what you really mean is quantum mechanics. And therefore the majority of physicists don't use the term; it's mostly used by philosophers." (Davies and Brown, 1986:71. Zoals geciteerd in Lange (2002), p. 260)

Of Sir Rudolf Peierls gelijk heeft in zijn stelling dat de Kopenhageninterpretatie dé interpretatie van de kwantummechanica is, valt moeilijk te zeggen. Om deze vraag te kunnen beantwoorden is verdere studie van de verschillende interpretaties noodzakelijk.

Behalve de Kopenhagen interpretatie zijn er vele andere interpretaties ontwikkeld. Er zijn zowel instrumentalistische, empiristische en realistische interpretaties ontwikkeld (Wikipedia, 2006g). Omdat de verschillende interpretaties van de kwantummechanica worden opgesteld vanuit dezelfde empirische achtergrond, zijn ze allemaal (zo goed als) empirisch equivalent. Om deze reden is het vrijwel onmogelijk om cruciale experimenten op te zetten die een keuze mogelijk maken tussen de verschillende interpretaties.

Behalve deze verschillende interpretaties, is er ook een visie die stelt dat de theorie van de kwantummechanica nog niet compleet is en moet worden aangevuld met verborgen variabelen. Dit is de verborgen variabelen interpretatie. Op het moment dat de theorie compleet is, zal volgens deze interpretatie blijken dat

de microwereld niet probabilistisch van aard is en dat superpositie en entanglement geen intrinsieke eigenschappen van de microwereld zijn. Deze verborgen variabelen interpretatie is erg belangrijk geweest in het opzetten van onderzoek naar entanglement.

In de jaren 1960 heeft John Bell een manier gevonden om te testen of entanglement een intrinsieke eigenschap van de microwereld is, of dat de kwantummechanische beschrijving onvolledig is en moet worden aangevuld met verborgen variabelen. Dit heeft geleid tot de formulering van de Bell-ongelijkheden en het opzetten van het onderzoek naar entanglement.

3.5 Testen van de kwantummechanica: Bells theorema

De EPR-paradox stelde de natuurkunde voor een dilemma: óf entanglement is een eigenschap van onze microwereld; óf de kwantummechanische beschrijving is geen complete beschrijving van deze microwereld. In het laatste geval moet de kwantummechanica worden aangevuld met zogenaamde verborgen variabelen. Dit dilemma heeft natuurkundigen lange tijd beziggehouden.

Zoals uitgewerkt wordt door Marc Lange (Lange, 2002), heeft ons idee over of de kwantummechanica wel of niet compleet is, grote invloed op ons begrip van de microwereld. Hij stelt dat als de kwantummechanica een complete beschrijving is, de 'collapse of the wave function' een verandering is in de toestand van het systeem. Als de kwantummechanica niet compleet is, is de 'collapse of the wave function' juist een verandering in onze kennis van het systeem:

"But if QM is complete, the particle was not inside *before* the measurement; its state was the superposition. It seems, then, that the measurement interaction *causes* the particle's state to change from the superposition to the pure state. This apparent change is known as the "collapse of the wave function." On the other hand, if QM is incomplete so that the particle was definitely inside even before the measurement was made, then the collapse of the wave-function is not a physical change in the particle. Rather, it is merely a change in our *knowledge* of the particle's state: before the measurement, we are 70 percent confident that the particle is inside the region, but after measurement, our confidence rises to 100 percent certainty. (Lange, 2002, p. 258)"

In 1964 publiceerde John Bell zijn beroemde Bell-ongelijkheden (Bell, 1964), die een mogelijkheid beschreven om experimenteel te testen of de kwantummechanica een onvolledige beschrijving van de wereld is. Bell-ongelijkheden zijn eigenlijk een theorema van alternatieven (Aczel, 2002, pp. 144-146). Als de ongelijkheden geschonden worden, is non-lokaliteit een belangrijke eigenschap van deze wereld. Als de ongelijkheden niet geschonden worden is de kwantummechanica een onvolledige beschrijving van de microwereld en moet de theorie aangevuld worden met verborgen variabelen. In de publicatie van zijn ongelijkheden doet John Bell geen uitspraak over of hij verwacht dat zijn ongelijkheden geschonden zullen worden of niet; hij geeft alleen een methode om dit experimenteel te testen. Volgens deze methode moet het fenomeen entanglement

bestudeerd worden en moet er worden gekeken in hoeverre een deeltje een ander deeltje instantaan kan beïnvloeden.

Sinds de publicatie van Bells theorema, zijn er veel experimenten uitgevoerd om deze ongelijkheden te testen.

3.6 Testen van Bell-ongelijkheden met fotonen

In de publicatie van zijn Bell-ongelijkheden, stelde John Bell voor experimenten uit te voeren met entangled elektronen. Omdat het op dat moment technologisch niet mogelijk was deze experimenten met elektronen uit te voeren, werden ze in eerste instantie uitgevoerd met entangled fotonen. Hierbij werd gekeken naar de polarisatierichting van deze fotonen. Een foton kan horizontaal of verticaal gepolariseerd zijn. Vóór meting bevinden de twee fotonen zich in een superpositie van de twee mogelijke polarisatierichtingen:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\{| \text{horizontaal} \rangle \pm | \text{verticaal} \rangle\} \quad (3.4)$$

De beroemdste experimenten waarin Bell-ongelijkheden worden getest met fotonen werden uitgevoerd door Alain Aspect. De uitkomsten van zijn experimenten leken te wijzen op een schending van Bell-ongelijkheden (Aspect *et al.*, 1981). Uit een schending van deze ongelijkheden moet worden geconcludeerd dat non-lokaliteit een belangrijke eigenschap van de microwereld is.

Alain Aspect heeft steeds geavanceerdere experimenten met entangled fotonen opgezet. Uiteindelijk heeft hij zelfs een experiment opgesteld waarmee werd uitgesloten dat een deeltje informatie over de toestand van het ene foton aan het andere doorgeeft. In dit experiment werden de entangled fotonen uitgezonden voordat de polarisatierichting van de polarizator vastgesteld was. Deze polarisatorrichting werd pas zó laat vastgelegd, dat het onmogelijk was dat een deeltje informatie van het ene foton aan het andere foton kon doorgeven. Dit deeltje kan zich namelijk maar met een eindige snelheid voortbewegen (zie ook paragraaf 3.3.1). Ook uit dit experiment bleek dat als het eerste deeltje bij meting een horizontale polarisatierichting had, het tweede deeltje een verticale polarisatierichting had en andersom. Hiermee werd niet alleen aangetoond dat er een correlatie zit tussen de polarisatierichtingen, zoals ook uit eerdere experimenten bleek. Ook werd aangetoond dat deze correlatie geen causale oorzaak kan hebben.

Inmiddels is Aspects experiment in veel verschillende vormen uitgevoerd en blijkt uit alle uitkomsten van de experimenten een schending van Bell-ongelijkheden. Alles wijst er dus op dat non-lokaliteit een belangrijke eigenschap is van fotonen.

3.7 Testen van Bell-ongelijkheden met elektronen

Na de experimenten waarbij Bell-ongelijkheden worden getest voor fotonen zijn er, zoals Miriam Blaauboer beschrijft (Blaauboer, 2005), inmiddels ook Bell-experimenten gedaan met protonen, kaonen, neutronen, koude atomen en foton-

atoomparen (Moehring *et al.*, 2004). In al deze experimenten is een schending van Bell-ongelijkheden gemeten.

Nu geaccepteerd is dat in al deze gevallen Bell-ongelijkheden geschonden worden, rijst de vraag of dit ook het geval is bij elektronen. Dit is verre van vanzelfsprekend, omdat elektronen in een vaste stof als gevolg van hun lading interactie met elkaar en met de ionen in het rooster hebben. Hoewel elektronen niet de eerste geladen deeltjes zijn waarmee Bell-ongelijkheden worden getest, zijn het wel de eerste geladen deeltjes die niet in de vrije ruimte worden getest. Experimenten naar Bell-ongelijkheden met elektronen zijn dus de eerste experimenten die uitgevoerd gaan worden met deeltjes die een sterke wisselwerking hebben met hun omgeving.

Op dit moment is men bezig met het ontwikkelen van methodes om Bell-ongelijkheden te testen met entangled elektronen. Het doel van mijn bacheloropdracht was het onderzoeken van de mogelijkheden om dit soort testen van Bell-ongelijkheden uit te voeren, gebruik makend van supergeleiding. Hieronder zal ik uitleggen wat supergeleiding is, hoe hiermee een experiment naar Bell-ongelijkheden kan worden opgezet en hoe verkregen resultaten geïnterpreteerd kunnen worden.

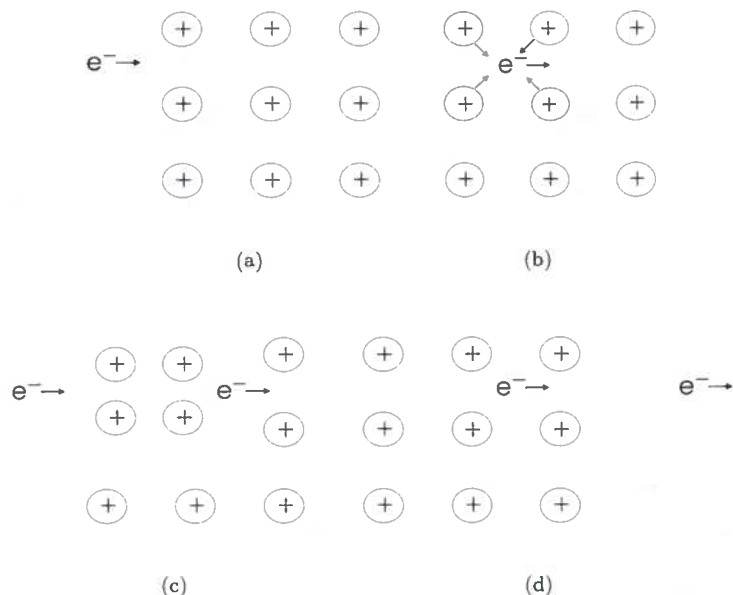
3.7.1 Supergeleiding

Supergeleiding is het fenomeen dat een metaal diamagnetisch is en geen weerstand heeft. Dit supergeleidende gedrag wordt door bepaalde metalen bij extreem lage temperaturen vertoond. Een voorbeeld van een supergeleidend metaal is aluminium, dat supergeleidend wordt bij temperaturen onder de 4.2K.

Een reden waarom supergeleiding goed kan worden gebruikt voor het testen van Bell-ongelijkheden is dat de theorie voorspelt dat in supergeleiders entangled paren van elektronen gevormd worden. Deze paren worden Cooperparen genoemd, naar Leon Neil Cooper. Deze Amerikaanse fysicus heeft samen met John Bardeen en John Robert Schrieffer de Nobelprijs gekregen voor hun bijdragen in het ontwikkelen van de BCS theorie van supergeleiding (Wikipedia, 2005d,a).

In figuur 3.2 is een model te zien van hoe Cooperparen gevormd worden. Hierbij zitten de positief geladen atomen in een metaalrooster. De elektronen kunnen zich vrij bewegen tussen de verschillende atomen. In figuur 3.2(a) is te zien dat een elektron bepaalde atomen nadert. In figuur 3.2(b) is te zien dat het elektron zich tussen vier atomen bevindt. De positieve lading van de atomen en de negatieve lading van de elektronen trekken elkaar nu lichtelijk aan. Hierdoor hebben de atomen de neiging zich naar het elektron toe te bewegen, waardoor een kleine roostertrilling ontstaat. Deze roostertrillingen zijn echter veel langzamer dan de beweging van het elektron. Hierdoor bevindt het elektron zich niet meer tussen de vier atomen op het moment dat deze vier atomen naar elkaar toe bewogen zijn. Doordat nu op het punt waar het elektron zich eerder bevond een netto positieve lading is ontstaan, wordt een negatieve lading, een volgend elektron, aangetrokken (figuur 3.2(c)). Hierdoor is een paar van twee elektronen gevormd, die een karakteristieke afstand in de ruimte van elkaar gescheiden zijn (figuur 3.2(d)). Deze twee elektronen worden samen een Cooperpaar genoemd³.

³Cooperparen zijn bosonen (in tegenstelling tot elektronen; dit zijn fermionen). Hierdoor is Bose-Einstein condensatie mogelijk, zodat alle Cooperparen in de laagst mogelijke energietoestand terecht komen.



Figuur 3.2: Model van de vorming van Cooperparen in een supergeleider

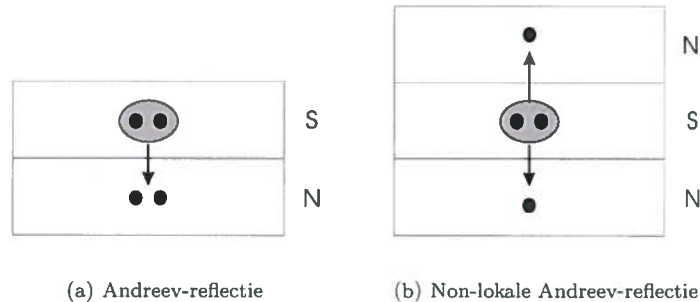
De twee elektronen in een Cooperpaar bevinden zich nu in een superpositie van mogelijke toestanden. Zoals beschreven in paragraaf 3.3, is het heel onwaarschijnlijk dat twee deeltjes die zich in dezelfde energietoestand bevinden, dezelfde spintoestand hebben. Om deze reden heeft het Cooperpaar twee mogelijke toestanden: het eerste elektron heeft spin up en het tweede spin down of het eerste heeft spin down en het tweede spin up. De superpositie kan nu op de volgende manier weergegeven worden:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\{|\uparrow\downarrow\rangle \pm |\downarrow\uparrow\rangle\} \quad (3.5)$$

Supergeleiding kan dus gebruikt worden als een bron van entangled elektronen, Cooperparen. Deze Cooperparen kunnen gebruikt worden in een experiment om Bell-ongelijkheden te testen.

3.7.2 Globale opzet experiment

Het doel van het experiment is te kijken of Bell-ongelijkheden geschonden worden. Hiervoor moet gekeken worden of entanglement aangetoond kan worden. Daarnaast moet men laten zien dat entangled elektronen instantaan op veranderingen in de toestand van één van beide elektronen reageren. Om dit laatste te kunnen testen moet een Cooperpaar in de ruimte gescheiden worden, waarbij entanglement behouden blijft. Hierna kan de spin van de elektronen gemeten worden. Uit de correlaties die hieruit volgen (zie paragraaf 3.7.5) kan afgeleid worden of Bell-ongelijkheden geschonden worden.



Figuur 3.3: Simpele voorstelling van Andreev-reflectie. De 'S' staat voor supergeleidend materiaal. De 'N' staat voor normaal metaal.

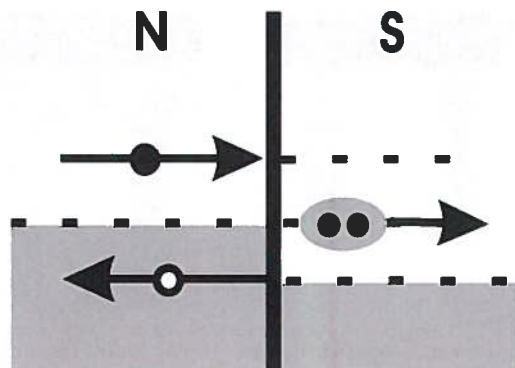
Andreev-reflectie

De eerste stap in een experiment waarbij Bell-ongelijkheden getest worden is dus het in de ruimte scheiden van de Cooperparen. Hiervoor wordt een normaal metaal verbonden met het supergeleidende metaal. Het doel is dat de Cooperparen overgaan naar het normale metaal, maar dat hun entanglement niet verbroken wordt. Dit gebeurt via Andreev-reflectie. Als we Andreev-reflectie heel simpel bekijken kan gezegd worden dat het Cooperpaar in de supergeleider twee entangled elektronen wordt in het normale metaal. Dit is te zien in figuur 3.3. Hierbij komt een Cooperpaar in het supergeleidende metaal aan bij de overgang tussen het supergeleidende en het gewone metaal. Vervolgens wordt het Cooperpaar gesplitst in twee losse elektronen die nog wel entangled zijn. Er zijn twee soorten Andreev-reflectie die op kunnen treden: gewone en non-lokale Andreev-reflectie. Bij de eerste gaan de elektronen samen een normaal metaal in (figuur 3.3(a)). Bij de tweede gaat de ene een bepaald stuk metaal in en de andere een ander stuk metaal. Dit is mogelijk omdat de twee elektronen in het Cooperpaar een bepaalde afstand van elkaar gescheiden zijn, zoals ik heb beschreven in paragraaf 3.7.1. Bij deze non-lokale Andreev-reflectie wordt dus een non-lokaal entangled elektronpaar gevormd (figuur 3.3(b)).

Hoewel het proces dat ik hierboven heb beschreven Andreev *reflectie* wordt genoemd, lijkt bovenstaande uitleg weinig te maken te hebben met ons algemene idee van reflectie. Er is echter een belangrijke reden waarom toch de term reflectie gebruikt wordt. Dit wordt duidelijk als we het proces andersom bekijken, dus van het normale metaal naar het supergeleidende metaal. Belangrijk hierbij is het begrip Fermi-niveau. Hieronder zal ik uitleggen wat een Fermi-niveau is, wat het voor invloed heeft op de termen die we gebruiken en uiteindelijk hoe Andreev-reflectie als een soort reflectie gezien kan worden.

In de natuurkunde wordt van stoffen vaak een Fermi-niveau gedefinieerd. Dit is het energie-niveau waarin het elektron zit dat de meeste energie heeft, als alle energieniveaus van beneden af volledig opgevuld worden.

Omdat de energie van elektronen gekwantiseerd is, kunnen elektronen zich in een eindig aantal discrete energietoestanden bevinden. Als deze elektronen zich om een atoomkern bewegen, kunnen we dit zien als verschillende energiebanen.



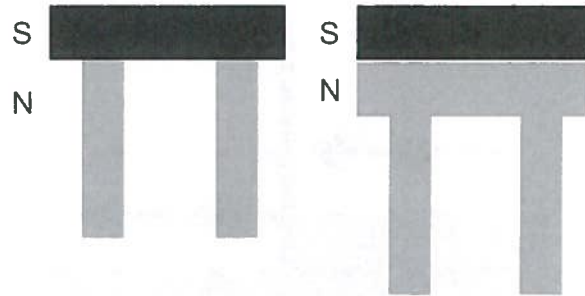
Figuur 3.4: Andreev-reflectie aan het oppervlak tussen een supergeleider en een normaal metaal. Een elektron vormt samen met een ander elektron een Cooperpaar, waarbij een gat gereflecteerd wordt.

Als we geen energie aan het atoom toevoegen, zullen de elektronen het liefst in een zo laag mogelijke energietoestand gaan zitten. Deze energietoestand is de elektronenbaan die het dichtst bij de atoomkern ligt. Door het Pauli-uitsluitingsbeginsel (zie ook paragraaf 3.3) echter, kunnen niet alle elektronen in dezelfde energietoestand zitten. De verschillende energieniveaus kunnen nu van beneden af worden opgevuld totdat alle elektronen op zijn. Dit kan gezien worden als de grondtoestand van het atoom: als er geen energie aan het atoom wordt toegevoegd, zal het zich meestal in de grondtoestand bevinden. De energie van het elektron met de hoogste energie wordt het Fermi-niveau genoemd.

Door het definiëren van een Fermi-niveau kan gedacht worden in termen van elektronen en gaten. Men gaat er hierbij in principe van uit dat tot het Fermi-niveau alle elektronenbanen volledig opgevuld zijn. Als dit niet zo is betekent dit dat zich hier een gat bevindt. Op deze manier kunnen in bepaalde processen gaten gecreëerd op opgevuld worden.

Als we het proces van Andreev-reflectie nu andersom bekijken (zie figuur 3.4), dus van het normale metaal naar het supergeleidende metaal, wordt duidelijk waar de term reflectie vandaan komt. Als een vrij elektron (met energie boven het Fermi-niveau) in een normaal metaal richting een supergeleider beweegt, kan het de supergeleider niet in, omdat alleen elektronparen de supergeleider in kunnen. Om deze reden vormt dit elektron een elektronenpaar met een tweede elektron, dat een energie heeft die lager is dan het Fermi-niveau. Hierdoor is één plaats in de opgevulde banen niet meer opgevuld; er wordt dus een gat gecreëerd. Dit tweede elektron beweegt richting de supergeleider, wat dus ook gezien kan worden als een gat de andere kant op beweegt. Als het eerste elektron bij de overgang van het normale naar het supergeleidende metaal aankomt, trekt het dus een tweede elektron met zich mee en wordt er niet alleen een Cooperpaar gecreëerd, maar wordt er ook een gat gereflecteerd.

Andreev-reflectie speelt een belangrijke rol in het in de ruimte scheiden van elektronenparen wat een essentieel onderdeel is van het testen van Bell-ongelijkheden. Dit zal ik in de volgende paragraaf bespreken.



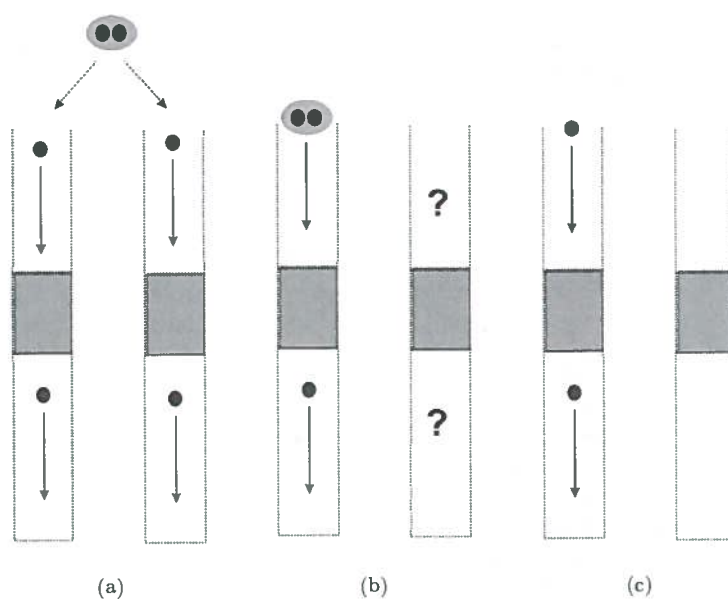
Figuur 3.5: Scheiden van elektronenparen. In het linker figuur wordt dit gedaan via non-lokale Andreev-reflectie. In het rechter figuur worden de elektronenparen in het normale metaal gescheiden.

Correlaties

Zoals ik hierboven heb beschreven is het door middel van Andreev-reflectie mogelijk entangled elektronenparen te vormen. Er zijn twee methodes hoe deze elektronenparen in de ruimte kunnen worden gescheiden. Een eerste manier is door gebruik te maken van non-lokale Andreev-reflectie. Een tweede manier is door gebruik te maken van normale Andreev-reflectie en de elektronen vervolgens in het normale metaal op een andere manier in de ruimte van elkaar te scheiden. Een versimpelde, schematische weergave hiervan is te zien in figuur 3.5. In het linker figuur zijn er twee zogenaamde ‘leads’ van normaal metaal aan de supergeleider bevestigd. Door middel van non-lokale Andreev-reflectie kan het eerste elektron van het elektronenpaar de ene lead in gaan, het tweede elektron de andere lead. In het rechter figuur splitst het normale metaal in twee ‘leads’ zodat de elektronenparen hier kunnen worden gescheiden. De technische details hiervan zal ik bespreken in paragraaf 3.7.4.

Het doel van het scheiden van de elektronenparen is te zorgen dat beide elektronen van het elektronenpaar een andere lead in gaan. Op deze manier is het mogelijk te testen of de elektronen inderdaad entangled zijn en of Bell-ongelijkheden geschonden worden. De twee elektronen gaan namelijk met eenzelfde snelheid door de leads en als ze entangled zijn komen dus tegelijkertijd aan het eind van de leads aan. Als de twee elektronen niet entangled zouden zijn, is de kans heel klein dat ze tegelijkertijd aankomen. Om deze reden kunnen we uit dit soort experimenten concluderen of de elektronen entangled waren. Dit zal ik hieronder uitwerken.

Om Bell-ongelijkheden te testen moeten de elektronen die aan het eind van de leads aankomen dus gemeten worden. Omdat het lastig is elektronen stuk voor stuk te meten, is het praktischer ervoor te kiezen om cross-correlaties te meten (Glattli *et al.*, 1997; Jehl *et al.*, 1999). Hierbij wordt over een bepaalde tijd gekeken of aan het eind van beide leads tegelijk elektronen aankomen of juist niet. Dit soort metingen worden ruismetingen genoemd. Er kunnen drie correlaties onderscheiden worden die een rol spelen in dit proces. Deze zijn te zien in figuur 3.6. De eerste soort correlaties is positieve correlaties (figuur 3.6(a)). De elektronen van het Cooperpaar gaan beide een andere lead in en



Figuur 3.6: Correlaties die kunnen bijdragen aan de ruis die gemeten kan worden. In (a): positieve correlaties die gemeten kunnen worden aan het eind van de leads doordat beide elektronen van een Cooperpaar een verschillende lead in gaan. In (b): neutrale correlaties doordat beide elektronen van het Cooperpaar dezelfde lead in gaan. In (c): negatieve correlaties doordat een enkel elektron door een lead gaat.

komen tegelijkertijd aan het eind hiervan aan. Dit is het soort correlaties dat wijst op entanglement. De tweede soort correlaties is neutrale correlaties (figuur 3.6(b)). Deze worden veroorzaakt doordat de elektronen van het Cooperpaar dezelfde lead in gaan. Er is nu geen uitspraak te doen over of er wel of niet tegelijkertijd een elektron aan het eind van de andere lead aankomt. Dit is de reden waarom deze correlaties neutraal genoemd worden. Een derde soort correlaties is de negatieve correlaties (figuur 3.6(c)). Deze worden veroorzaakt door vrije elektronen die zich voortbewegen door de leads. Deze komen dus niet uit de supergeleider, maar bevinden zich al in het metaal. De reden waarom deze correlaties negatief zijn is dat twee elektronen elkaar afstoten en er in principe dus niet twee elektronen tegelijkertijd aan het eind van de andere lead zullen komen.

De cross-correlaties kunnen worden gemeten door de twee uitgangen van de leads met elkaar te verbinden met behulp van een XNOR-poort. Deze geeft de volgende resultaten:

In A	In B	Uit
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Positieve correlaties geven dus een waarde 1. Negatieve geven waarde 0. Neutrale correlaties geven soms een waarde 0 en soms een waarde 1. Omdat we de correlaties over een langere tijdsduur bepalen ligt de waarde van de neutrale correlaties tussen de 0 en de 1.

Omdat alleen de netto correlaties gemeten kunnen worden, is het belangrijk de experimentele opstelling te optimaliseren zodat de negatieve en neutrale correlaties onderdrukt worden. Hierdoor zou het theoretisch mogelijk moeten zijn een positieve correlatie te meten en hieruit te kunnen concluderen dat er inderdaad entangled elektronenparen in de leads aanwezig waren.

In de volgende paragrafen zal ik eerst ingaan op wat eerder onderzoek al aan resultaten heeft opgeleverd. Daarna zal ik verder ingaan op de details van de experimentele opzet.

3.7.3 Eerder onderzoek

Zoals ik heb besproken in paragraaf 3.7, zijn Bell-ongelijkheden al getest met entangled paren fotonen, protonen, kaonen, neutronen, koude atomen en foton-atoomparen. Elektronen zijn de eerste deeltjes waarmee Bell-experimenten worden gedaan die een sterke interactie hebben met elkaar en met de omgeving. Deze interacties komen voort uit het feit dat door de lading van de elektronen, Coulombkrachten een belangrijke rol spelen. Er zijn weliswaar al Bell-experimenten gedaan met andere geladen deeltjes, protonen, maar deze worden in de vrije ruimte gebruikt en hebben daardoor geen interacties met elkaar en met andere materie. Omdat de elektronen in dit experiment zich in de vaste stof bevinden, hebben zij door hun lading direct interacties met elkaar en met de ionen in het rooster.

Opvallend in de vele publicaties over onderzoek naar entanglement met elektronen is dat veel artikelen kijken naar theoretische modellen van mogelijke opstellingen. Deze opstellingen zijn vaak praktisch (nog) niet uitvoerbaar. Toch zijn er een aantal belangrijke experimentele resultaten op het gebied van onderzoek naar entanglement te vinden.

Ten eerste heeft men non-lokale Andreev-reflectie waargenomen bij structuren waarbij twee ferromagneten aan een supergeleider gekoppeld zitten op de manier zoals in figuur 3.8(b). Zoals ik zal bespreken in paragraaf 3.7.4 zijn deze F-S-F structuren alleen te gebruiken om non-lokale Andreev-reflectie te testen en zijn ze niet geschikt voor experimenten gerelateerd aan Bell-ongelijkheden.

Ten tweede heeft men, zoals beschreven in (Russo *et al.*, 2005), experimenteel non-lokale Andreev-reflectie waargenomen bij structuren zoals figuur 3.8(a). Hierbij heeft men een soort lagenstructuur gefabriceerd, waarbij een supergeleider geplaatst is tussen twee normaal-metalen electrodes. Men heeft non-lokale Andreev-reflectie waargenomen bij hogere biasspanning. Zoals aangegeven in de samenvatting van het artikel:

“We report quantum transport experiments that demonstrate the occurrence of both non-local Andreev reflection and elastic cotunneling through superconducting layers of thickness comparable to the superconducting coherence length. ... Our results are relevant for the realization of many proposed entangled devices based on the use of a superconductor.” (Russo *et al.*, 2005)

Nu non-lokale Andreev-reflectie is waargenomen, is het mogelijk dit te gebruiken in experimenten naar Bell-ongelijkheden. In de volgende paragraaf zal ik de verschillende mogelijke opstellingen hiervoor behandelen.

3.7.4 Verschillende mogelijke opstellingen

In het ontwerpen van een opstelling voor het experiment moeten verschillende keuzes gemaakt worden. Welke metalen worden bijvoorbeeld voor de supergeleider en de leads gebruikt? Op deze technische details zal ik niet ingaan, maar verwijs ik naar het verslag van mijn bacheloropdracht. Wel zal ik twee fundamenteel verschillende soorten opstellingen bespreken. In deze opstellingen zal ik twee stappen onderscheiden die cruciale keuzes weergeven in het opzetten van het experiment. De eerste stap is het optimaliseren van de opstelling, waarbij negatieve en neutrale correlaties onderdrukt worden. De tweede stap is de filtering die aan het eind van de leads zal plaatsvinden.

Twee fundamenteel verschillende opstellingen

Er zijn twee fundamenteel verschillende soorten opstellingen mogelijk. Deze opstellingen zijn te zien in figuren 3.7 en 3.8. De eerste soort is een vorkstructuur en maakt gebruik van normale Andreev-reflectie (figuur 3.7) (Lesovik *et al.*, 2001; Lebedev *et al.*, 2004; Chtchelkatchev *et al.*, 2002; Martin *et al.*, 2002; Bouchiat *et al.*, 2002). De andere is een lagenstructuur en maakt gebruik van non-lokale Andreev-reflectie (figuur 3.8) (Russo *et al.*, 2005; Prada & Sols, 2004; Bignon *et al.*, 2004; Falci *et al.*, 2001). In de eerste opstelling worden de Coo-

perparen dus pas in het metaal van elkaar gescheiden; in de tweede opstelling gebeurt dit bij de overgang van de supergeleider naar het normale metaal.

Om een keuze te kunnen maken welke van de twee soorten opstellingen het best in het experiment kan worden gebruikt, kunnen de verschillende voor- en nadelen van deze opstellingen tegen elkaar worden afgewogen. Op basis van wiskundige modellen kan worden bepaald welke opstelling procentueel de meeste positieve correlaties (zie figuur 3.6) zal opleveren (meer hierover is te vinden in paragraaf 4.2). Dit kan worden afgewogen tegen de praktische voor- en nadelen van de twee verschillende soorten opstellingen. De lagenstructuur is bijvoorbeeld technisch gezien veel gemakkelijker te maken dan de vorkstructuur.

Verskillende soorten manieren om de elektronenparen in de ruimte te scheiden

De twee verschillende opstellingen moeten voordat ze experimenteel gebruikt kunnen worden eerst worden geoptimaliseerd. Er zijn twee storende processen die kunnen optreden in dit experiment: ten eerste het proces dat twee entangled elektronen samen een lead ingaan (dit leidt tot neutrale correlaties, zie figuur 3.6(b)); ten tweede het proces dat vrije elektronen zich door de leads bewegen (dit leidt tot negatieve correlaties, zie figuur 3.6(c)).

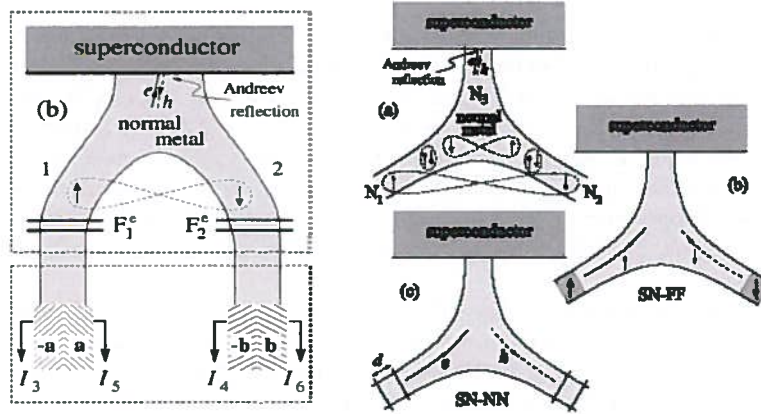
Het is niet mogelijk de beweging van vrije elektronen te onderdrukken. Uit theoretische modellen blijkt echter dat de invloed hiervan verwaarloosbaar is (Blanter & Büttiker, 1997).

Het is wel mogelijk de neutrale correlaties te onderdrukken. De verschillende methodes hiervoor zal ik hieronder bespreken. Hoewel er twee fundamenteel verschillende opstellingen mogelijk zijn, zijn de optimalisatiemethodes die gebruikt kunnen worden voor beide gelijk.

Om ervoor te zorgen dat twee entangled elektronen niet samen één lead ingaan kan gebruik worden gemaakt van zogenaamde splitters. Deze kunnen in de lagenstructuur geplaatst worden tussen de supergeleider en de leads; in de vorkstructuur kunnen ze geplaatst worden op het punt waar het normale metaal zich splitst. In figuur 3.7.4 zijn schematische voorstellingen te zien van vorkstructuren waarin splitters geplaatst zijn. De functie van de splitters is dat ze de elektronen in de ruimte scheiden, maar hierbij niet hun entanglement vernietigen.

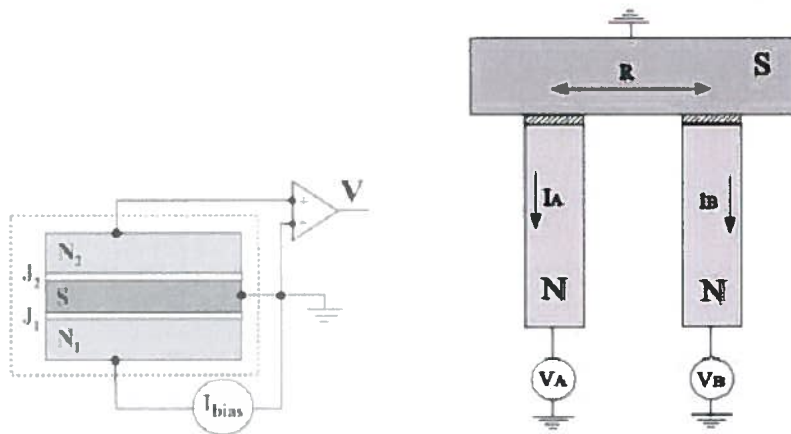
Er kunnen vijf mogelijke splitters onderscheiden worden:

1. Quantum dots (Recher *et al.*, 2004)
2. Luttinger liquids, zoals carbon nanotubes (Recher *et al.*, 2004)
3. Resistive leads, waardoor er een dynamisch Coulomb blokade effect optreedt (Recher *et al.*, 2004)
4. Fabry-Perot double barrier structures (Martin *et al.*, 2002)
5. Leads die van antiparallel gepolariseerde ferromagneten gemaakt zijn in plaats van van normale metalen (Deutscher & Feinberg, 2000; Deutscher, 2002; Melin & Feinberg, 2004; Giroud *et al.*, 2003; Beckmann & Weber, 2004; Taddei & Fazio, 2002)



(a) Weergave van de vorkstructuur. (b) Weergave van de vorkstructuur waarin ver-
Overgenomen uit: (Chtchelkatchev Overgenomen uit: (Lesovik *et al.*, 2001)

Figuur 3.7: Twee weergaven van de vorkstructuur



(a) De N-S-N-structuur waarbij een super- (b) De N-S-N-structuur met een supergeleider
geleider geplaatst is tussen twee normaal- die op de normaal-metalen leads geplaatst is.
metalen leads. Overgenomen uit: (Russo Overgenomen uit: (Bignon *et al.*, 2004)
et al., 2005)

Figuur 3.8: Twee vormen van de lagenstructuur

Hieronder zal ik de verschillende splitters stuk voor stuk uitgebreider bespreken.

Quantum dots kunnen worden gezien als kleine punten waarop zich precies één elektron kan bevinden. Op het punt waar we de Cooperparen willen scheiden kunnen twee quantum dots geplaatst worden, die een kleine afstand van elkaar gescheiden zijn. Van de linker quantum dot kan het elektron alleen overgaan naar de linker lead, van de rechter alleen naar de rechter lead. Als een Cooperpaar bij de quantum dots aankomt is de kans groot dat één elektron van het Cooperpaar op de ene quantum dot komt en de andere op de tweede quantum dot. Dit leidt ertoe dat de entangled elektronen in de ruimte worden gescheiden.

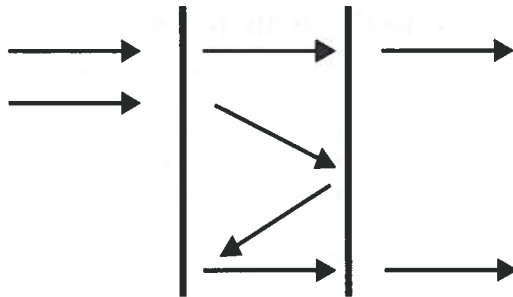
Hoewel het gebruik van quantum dots een praktische methode is om Cooperparen te scheiden, hebben we in dit onderzoek ervoor gekozen geen gebruik te maken van quantum dots. De reden hiervoor is dat de onderzoeksgroep Lage Temperaturen aan de Universiteit Twente niet gespecialiseerd is in het maken en gebruiken van quantum dots. Voor onderzoeksgroepen elders, is dit echter een bruikbare optie.

Luttinger liquids werken ongeveer hetzelfde als quantum dots. Ze kunnen worden gezien als eendimensionale draden waarop zich elektronen kunnen bevinden. Door de Coulombafstoting kunnen de elektronen niet te dicht bij elkaar zitten en is het ook hier alleen mogelijk dat één elektron tegelijkertijd het materiaal op komt. Op deze manier is een splitsing in de Cooperparen mogelijk. Een belangrijk verschil met quantum dots is dat het maken en experimenteel gebruiken van Luttinger liquids nog vooral een theoretische mogelijkheid is, terwijl quantum dots al wel in toepassingen gebruikt zijn. Voor ons experiment zijn deze dus geen bruikbare optie.

De derde optie voor een splitter zijn ‘resistive leads’. Hierbij wordt voor de leads een materiaal gekozen dat een hoge weerstand heeft. Doordat de weerstand van de lead hoog is, is de snelheid waarmee de elektronen zich hierin voortbewegen laag. Hierdoor bevindt het eerste elektron zich relatief lang aan het begin van de lead. De kleine negatieve lading van dit elektron stoot nu via Coulombkrachten het tweede elektron af. Hierdoor is de kans dat het tweede elektron de andere lead ingaat relatief groot.

Fabry-Perot double barrier structures zijn de vierde soort mogelijke structuren die gebruikt kunnen worden als splitter (Wikipedia, 2006c). Hierbij zijn er twee barrières waar de elektronen doorheen moeten om in de leads terecht te komen. Bij iedere barrière is er een bepaalde kans dat het elektron er doorheen gaat en een bepaalde kans dat het weerkaatst wordt. In de leads komen niet alleen de elektronen terecht die bij beide barrières doorgelaten zijn: zoals te zien is in figuur 3.9 komen ook de elektronen in de leads terecht die bij de eerste barrière doorgelaten werden, vervolgens bij de tweede barrière werden weerkaatst, weer weerkaatsten op de eerste barrière en vervolgens door de tweede barrière gaan; ook elektronen die vier, acht etc. keer worden weerkaatst komen aan bij het begin van de leads.

Elektronen kunnen worden gezien als golven. Bij weerkaatsing treedt een faseverschuiving van deze golven op. Als de golven van de doorgelaten elektronen in fase zijn, versterken ze elkaar; als ze in tegenfase zijn doven ze elkaar uit. De fase van de golf is afhankelijk van de energie van het elektron.



Figuur 3.9: Schematische voorstelling van de werking van Fabry-Perot double barrier structures.

Bij Fabry-Perot-structuren blijkt dat alleen bij elektronen met een specifieke energie versterking en dus netto transmissie optreedt (Brinkman, 2003, pp. 19-21). Bij welke energie dit het geval is, is afhankelijk van de specificaties van de Fabry-Perot-structuur. Doordat deze structuren dus alleen elektronen met een bepaalde energie doorlaten, kunnen ze worden gebruikt om de Cooperparen te splitsen.

De laatste optie om de elektronenparen in de ruimte te scheiden is het gebruik van ferromagneten. Ferromagneten zijn metalen die alleen elektronen met spin up of alleen elektronen met spin down doorlaten. Op basis van deze fysische eigenschappen zou het dus een goede scheidingsmethode moeten zijn om een ferromagneet die alleen spin up doorlaat in de ene lead te plaatsen en een ferromagneet die alleen spin down doorlaat in de andere lead. In de praktijk werkt dit echter niet. Dit komt doordat bij het gebruik van ferromagneten entanglement tussen de elektronen verbroken wordt. Er kan namelijk over de elektronen die door de ferromagneet gegaan zijn met zekerheid worden gezegd of ze spin up of spin down hebben. Hierdoor bevinden ze zich niet meer in een superpositie van toestanden, is entanglement vernietigd en is het niet mogelijk Bell-ongelijkheden te testen.

Dit probleem kan worden opgelost door gebruik te maken van meer dan twee ferromagneten (Melin, 2001b,a) en dus ook meer dan twee leads. Het is nu niet mogelijk te weten of een elektron de ene of de andere ferromagneet ingegaan is, zodat we geen zekere kennis meer hebben over de toestand van het elektron. Op deze manier blijft entanglement behouden.

Het nadeel van werken met meerdere leads met ferromagneten is dat de structuren waarmee gewerkt wordt veel ingewikkelder worden als er gebruik gemaakt moet worden van meer dan twee leads. Het gebruiken van deze ferromagneten als splitters is dus een technisch minder goed haalbare optie.

Op basis van praktische overwegingen is het dus mogelijk een keuze te maken welke splitter het beste gebruikt kan worden. Uit bovenstaande overwegingen kan worden geconcludeerd dat de Fabry-Perot double barrier structures en de resistive leads de beste opties zijn om in dit onderzoek te gebruiken als splitters.

3.7.5 Testen van Bell-ongelijkheden

Om Bell-ongelijkheden te testen moeten de correlaties aan het eind van de leads gemeten worden. Om dit mogelijk te maken, moet er gebruik worden gemaakt van filters, zodat gemeten kan worden hoeveel deeltjes met spin in een bepaalde richting aan het eind van een lead aankomen. In beide leads wordt een filter geplaatst, wat het mogelijk maakt cross-correlaties (zie paragraaf 3.7.2) te meten.

Voor de filtering kunnen dezelfde methodes worden toegepast als voor het splitsen van de Cooperparen (zie paragraaf 3.7.4). De enige van deze splitsingsmethodes die niet gebruikt kan worden voor het filteren van Cooperparen, is het gebruik van resistive leads. Een methode die niet geschikt is voor het splitsen van de Cooperparen, maar die wel gebruikt kan worden voor filters, is het gebruik van ferromagneten. Omdat bij meting entanglement toch wordt vernietigd, is het niet erg als de filters hier al voor zorgen.

Om Bell-ongelijkheden te testen moet de spin van het non-lokale entangled paar langs drie verschillende, niet-orthogonale assen gemeten worden (Recher *et al.*, 2004). Hiervoor moet het filter in drie verschillende richtingen gepolariseerd worden. Omdat dit met ferromagneten technisch relatief makkelijk realiseerbaar is, is het gebruik van ferromagneten als filters een goede optie.

Zoals in het artikel van Recher, Saraga en Loss beschreven wordt, laat de volgende vergelijking zien wanneer kan worden geconcludeerd dat Bell-ongelijkheden geschonden zijn:

$$P(\hat{a}+, \hat{b}+) \leq P(\hat{a}+, \hat{c}+) + P(\hat{c}+, \hat{b}+) \quad (3.6)$$

In deze vergelijking representeren $\hat{a}$, $\hat{b}$ and $\hat{c}$ de drie verschillende assen waarlangs de spin van de inkomende deeltjes gemeten zal worden; P representeert de waarschijnlijkheid. $P(\hat{a}+, \hat{b}+)$ representeert dus bijvoorbeeld de kans dat een deeltje in de eerste lead met spin up in de a-richting gevonden wordt en een deeltje in de tweede lead met spin up in de b-richting.

Als $P(\hat{a}+, \hat{b}+)$ kleiner of gelijk is aan $P(\hat{a}+, \hat{c}+) + P(\hat{c}+, \hat{b}+)$ betekent dit dat Bell-ongelijkheden geschonden zijn. Non-lokaliteit is nu een intrinsieke eigenschap van onze microwereld. Als $P(\hat{a}+, \hat{b}+)$ groter is dan $P(\hat{a}+, \hat{c}+) + P(\hat{c}+, \hat{b}+)$, is de kwantummechanische beschrijving van de microwereld onvolledig en moet ze worden aangevuld met verborgen variabelen. Meer over hoe men tot deze formule is gekomen is te vinden in (Bell, 1966) en (Recher *et al.*, 2004).

3.8 Conclusie

In dit hoofdstuk heb ik een onderzoeksopzet besproken om Bell-ongelijkheden te testen met elektronen.

Door het uitvoeren van het experiment dat ik hierboven heb beschreven is het mogelijk Bell-ongelijkheden te testen. Dit kan ons een antwoord geven op de vraag die natuurkundigen al lange tijd bezig houdt: is entanglement een eigenschap van de microwereld en vinden er dus op bepaalde momenten non-causale fenomenen plaats?

Deze non-causale eigenschappen die in de kwantummechanische theorie worden voorspeld hebben er aan het begin van de 20^e eeuw toe geleid dat grote

natuurkundigen als Albert Einstein niet geloofden dat de kwantummechanica een volledige beschrijving van de werkelijkheid kan zijn. Inmiddels kijkt men hier anders tegenaan. De experimentele voorspellingen die de theorie van de kwantummechanica doet, zijn inmiddels zo vaak experimenteel bevestigd, dat veel onderzoekers niet meer anders kunnen dan geloven in de non-lokaliteit van de microwereld. Hierbij zijn ze bereid te accepteren dat hun intuïties over causaliteit niet meer opgaan in de microwereld; ze hebben meer vertrouwen in de wiskundige beschrijving van de kwantummechanica dan in hun eigen causale intuïties en zijn bereid te accepteren dat deze intuïties in de microwereld niet meer opgaan.

Het hierboven beschreven experimentele onderzoek naar entanglement zal ik in mijn wetenschapsfilosofische onderzoek gebruiken als casestudy om een antwoord te vinden op de vraag of causaal redeneren in kwantummechanische experimenten elimineerbaar is. In het komende hoofdstuk zal ik me allereerst bezighouden met de vraag welke soorten modellen een rol spelen in het experimentele onderzoek.

Hoofdstuk 4

Modellen in het experimentele onderzoek naar entanglement

In hoofdstuk 2 heb ik drie verschillende soorten kennis uitgewerkt die een rol kunnen spelen in het opzetten van kwantummechanische experimenten. Ten eerste is dit theoretische kennis, ten tweede kennis uit experimenten en ten derde kennis uit modellen.

Er zijn verschillende soorten modellen te onderscheiden. In mijn onderzoek zal ik het onderscheid van Mieke Boon aanhouden. Zij heeft vier soorten modellen gekarakteriseerd: nomo-mathematische, mechanistische, diagrammatische en experimentele. Het nomo-mathematische en het diagrammatische model behandelt ze in haar artikel “How science is applied in technology” (Boon, 2006b). Hieronder zal ik uitwerken wat deze vier soorten modellen precies inhouden en welke rol ze spelen in het onderzoek dat ik heb beschreven in hoofdstuk 3.

Van de vier soorten modellen kan worden gesteld dat instrumenten in verschillende mate een rol spelen binnen deze modellen. In nomo-mathematische modellen spelen instrumenten een minimale rol; in mechanistische modellen wordt de rol van instrumenten wat groter; diagrammatische modellen staan nog dichterbij de instrumenten; experimentele modellen zijn van de vier de soort modellen die het dichtst bij instrumenten en het experiment zelf staan.

De vier verschillende soorten modellen zijn in die zin aan elkaar verbonden, dat kennis uit het ene model gebruikt kan worden bij het opstellen en uitwerken van het andere model. Toch zijn de modellen niet deductief uit elkaar af te leiden. Behalve kennis uit de verschillende andere modellen wordt er namelijk ook andere kennis verwerkt in het op te zetten model.

Hieronder zal ik uitwerken wat voor soort modellen we tegenkomen in het onderzoek dat ik heb beschreven in hoofdstuk 3. Hierbij zal ik beginnen met de mechanistische modellen, omdat kennis van dit soort modellen belangrijk is in het beschrijven van de drie andere soorten modellen. Hierna zal ik achtereenvolgend nomo-mathematische, diagrammatische en experimentele modellen beschrijven.

4.1 Mechanistische modellen

Mechanistische modellen hebben tot doel het mechanisme achter de fenomenen te vinden en zo een causale verklaring te geven voor het fenomeen. Om deze reden wordt er in dit soort modellen geredeneerd in termen van entiteiten met capaciteiten, zodat een model verkregen kan worden van het causale gedrag van de entiteit.

In het experimentele onderzoek naar entanglement spelen verschillende mechanistische modellen een belangrijke rol. Deze verschillen in complexiteit en bouwen als het ware op elkaar voort. Het mechanistische model van entanglement maakt bijvoorbeeld gebruik van het mechanistische model van elektronen en van Cooperparen. Hieronder zal ik verschillende mechanistische modellen bespreken die een rol spelen in het opzetten van het experiment naar entanglement. Hierbij zal ik beginnen met de meest fundamentele modellen zoals de mechanistische modellen van elektronen en Cooperparen. Vervolgens zal ik het mechanistische model van entanglement bespreken.

4.1.1 Elektronen, Cooperparen en hun capaciteiten

Een eerste mechanistisch model dat een belangrijke rol speelt in het onderzoek naar entangled elektronen, is het model van het elektron. Een elektron blijkt experimenteel zowel golf- als deeltjeseigenschappen te kunnen vertonen. Voorbeelden van capaciteiten die in het mechanistische model aan het elektron worden toegekend zijn:

1. Een elektron heeft een bepaalde energie
2. Een elektron kan botsingsprocessen aangaan
3. Een elektron kan interfereren met zichzelf of met anderen
4. Een elektron heeft een elektrische lading, waardoor twee elektronen elkaar afstoten
5. Een elektron heeft spin

Een tweede mechanistisch model is het model van Cooperparen. Dit model is opgesteld door Bardeen, Cooper en Schrieffer. Zij hebben via een nomo-mathematisch model een mechanistisch model voor supergeleiding afgeleid. Opmerkelijk is dat het mechanistische model hiervan belangrijker gevonden lijkt te worden dan het nomo-mathematische model: nu het mechanistische model er is, is het nomo-mathematische model voor veel toepassingen overbodig. Ook aan Cooperparen zijn bepaalde capaciteiten toegekend:

1. Een Cooperpaar bestaat uit twee elektronen die entangled met elkaar zijn
2. Een Cooperpaar gedraagt zich als een deeltje met integer spin (een boson) en een lading die gelijk is aan twee keer de elektronlading
3. Een Cooperpaar kan worden gevormd binnen een supergeleider bij lage temperaturen
4. Een Cooperpaar kan Andreev-gereflecteerd worden. Het proces van Andreev-reflectie kan worden begrepen door middel van een derde mechanistisch model, dat ik fysisch heb beschreven in paragraaf 3.7.2

4.1.2 Entanglement en causaliteit

Entanglement is, als we het fysisch interpreteren, het afhankelijk zijn van de toestand van het ene systeem van de toestand van het andere systeem. Dit principe komen we overal tegen. Een voorbeeld hiervan is het Pauli-uitsluitingsbeginsel voor fermionen. Hierin wordt gesteld dat twee fermionen zich niet in precies dezelfde toestand kunnen bevinden. Als ze dus beide in dezelfde energietoestand zitten, zullen ze tegengestelde spintoestanden moeten hebben: de een moet spin up hebben, de ander spin down. De twee fermionen zijn nu entangled, omdat de spintoestand van het ene deeltje afhankelijk is van de spintoestand van het andere deeltje.

Als we naar bovenstaand voorbeeld van entanglement kijken, lijkt dit fenomeen geen interpretatieproblemen op te leveren. Als we echter een mechanistisch model opstellen van twee entangled deeltjes die in de ruimte van elkaar gescheiden zijn, komen deze interpretatieproblemen wel naar voren. Voor meting bevinden deze twee entangled deeltjes zich nu in een superpositie van mogelijke toestanden. Als er een meting wordt uitgevoerd op deeltje 1, vervalt deze superpositie, waardoor ook de toestand van deeltje 2 verandert. Wiskundig wordt voorspeld dat deze reactie *instantaan* gaat. Dit gaat tegen ons idee van causaliteit in.

Het mechanistische model van entanglement dat ik hierboven heb beschreven heeft een opmerkelijke eigenschap. Een mechanistisch model wordt namelijk vaak gezien als een model dat causale relaties weergeeft. Bij entanglement geeft dit model echter geen causale, maar juist non-causale relaties weer, omdat het idee van entanglement is dat causaliteit in deze situatie niet meer opgaat. Ondanks dat er echter non-causale relaties worden weergegeven, kunnen deze relaties wel gezien als fysische wisselwerkingen of interacties. Het gebruik van non-causale relaties in mechanistische modellen is om deze reden wel acceptabel. Hierbij wordt er dus niet op basis van causale relaties, maar op basis van capaciteiten van entiteiten geredeneerd.

4.2 Nomo-mathematische modellen

Een tweede soort modellen die Boon onderscheidt zijn nomo-mathematische modellen. In dit soort modellen wordt een fysisch fenomeen of proces gerepresenteerd door een set van mathematische vergelijkingen. Het voorvoegsel 'nomo' geeft expliciet aan dat het hier om een *fysisch* geïnterpreteerde set van vergelijkingen gaat, die niet meer abstract is en die niet meer los staat van concrete fysische systemen. In deze nomo-mathematische modellen worden de fysische systemen die in de theorie toegekend zijn aan bepaalde axioma's dus wiskundig uitgewerkt.

Boon stelt dat er drie verschillende soorten wetenschappelijke kennis een rol spelen in het construeren van een nomo-mathematisch model. Ten eerste spelen hierbij volgens haar theoretische of fundamentele principes een belangrijke rol. Voorbeelden die ze hiervan geeft zijn ten eerste behoudswetten zoals de wet van behoud van massa. Ten tweede zijn dit volgens haar theoretische principes zoals de bewegingswetten van Newton en de Maxwell-vergelijkingen.

Een tweede soort kennis die volgens Boon een belangrijke rol speelt in het op-

zetten van nomo-mathematische modellen zijn beschikbare natuurwetenschappelijke wetten die het gedrag van het fenomeen wiskundig beschrijven. Deze wetten bestaan uit theoretische en puur empirische componenten. Puur empirische wetten worden afgeleid uit metingen van relaties tussen de fysische parameters. De wetenschappelijke wetten die theoretische termen bevatten, worden meestal afgeleid van mathematische wetten die (combinaties van) de theoretische principes representeren.

De derde soort kennis waarvan door Boon wordt aangegeven dat ze belangrijk is in het opzetten van nomo-mathematische modellen, is causaal begrip van het fysische gedrag. Dit causale begrip van het fysische gedrag is volgens Boon nodig om simplificaties, benaderingen en uitbreidingen van mathematisch geformuleerde wetten te kunnen doen (Boon, 2006b, p. 42). Dit causale begrip van fenomenen kan worden opgedaan uit een mechanistisch model.

Zoals ik hierboven heb gesteld, wordt in een nomo-mathematisch model aan de abstracte vergelijkingen en symbolen uit de theoretische kennis fysische betekenis toegekend. In het geval van de kwantummechanica verwachten we volgens dit idee dus dat er fysische betekenis wordt toegekend aan de Schrödingervergelijking. Opmerkelijk is dat er in het nomo-mathematische model niet aan deze golfvergelijking, maar aan haar kwadraat fysische betekenis wordt toegekend. Hierbij wordt gesteld dat het kwadraat van de Schrödingervergelijking de waarschijnlijkheid weergeeft dat een deeltje zich in een bepaalde toestand bevindt.

In nomo-mathematische modellen wordt bovendien de theoretische kennis wiskundig verder uitgewerkt. Via deze wiskundige uitwerking kan, gebruik makend van de wiskunde van de lineaire algebra, het principe van superpositie en uiteindelijk van entanglement wiskundig afgeleid worden. Deze wiskundige afleiding is te vinden in hoofdstuk 5 en zal ik in dat hoofdstuk ook wetenschapsfilosofisch analyseren. Zoals in hoofdstuk 5 te vinden is, zijn niet alle stappen in deze wiskundige afleiding deductief. Deze niet-deductieve stappen worden gemaakt door gebruik te maken van kennis uit andere modellen, bijvoorbeeld het mechanistische of het diagrammatische model.

Uit hoofdstuk 3 blijkt dat er in het opzetten van het kwantummechanische experiment weinig gebruik gemaakt wordt van wiskundige kennis. Wiskundige formules komen in dit hoofdstuk nauwelijks voor; een belangrijkere rol is weggelegd voor het denken in termen van entiteiten met capaciteiten, zoals in het mechanistische model naar voren komt. In het opzetten van het experiment naar entanglement, speelt het nomo-mathematische model dus een ondergeschikte rol.

Wel vormt het nomo-mathematische model een rechtvaardiging van waarom we dit experiment uitvoeren. In het experiment naar entanglement wordt namelijk getest of de kwantummechanische beschrijving van de microwereld een complete beschrijving van deze microwereld is. Dit wordt gedaan door te testen of de meest problematische wiskundige voorspelling van de theorie, het optreden van entanglement, inderdaad experimenteel waar te nemen is.

Op bepaalde punten in het opzetten van het experiment spelen nomo-mathematische modellen echter wel een belangrijke rol. Bepaalde keuzes in het ontwerpproces kunnen niet worden gemaakt op basis van puur mechanistische

redenaties. Hieronder zal ik twee voorbeelden hiervan bespreken die in het opzetten van dit experiment een belangrijke rol spelen.

Een eerste voorbeeld heeft te maken met de precieze experimentele structuur die kan worden gebruikt in het experiment. Op basis van mechanistische kennis kan worden gesteld dat hiervan twee vormen mogelijk zijn. Ten eerste kan er gebruik worden gemaakt van een lagenstructuur, waarvan mechanistisch kan worden gezegd dat de elektronen van de Cooperparen bij de overgang van het supergeleidende naar het normale metaal van elkaar gescheiden worden. Ten tweede kan er gebruik gemaakt worden van een vorkstructuur waarbij deze splitsing pas in het normale metaal plaatsvindt.

De keuze welke van deze twee structuren procentueel de meeste Cooperparen scheidt, kan niet gemaakt worden op basis van redenaties over deeltjes met eigenschappen. Om deze keuze te kunnen maken, moet het mechanistische model worden gekoppeld aan een nomo-mathematisch model. In dit nomo-mathematische model moeten de waarschijnlijkheden dat de twee elektronen beide een andere lead in tunnels voor beide structuren berekend en vergeleken worden. Hierbij moeten parameters meegenomen worden als de transparantie van de grenslaag tussen de supergeleider en het normale metaal, de afstand tussen de leads, de breedte van de leads en de effectiviteit in het onderdrukken van twee deeltjes die dezelfde lead ingaan. In het bepalen van deze waarschijnlijkheden kan ook een rol weggelegd zijn voor een diagrammatische model. Meer over diagrammatische modellen is te vinden in paragraaf 4.3. Door het opstellen van dit nomo-mathematische model, eventueel gebruik makend van een diagrammatisch model, kan worden voorspeld welke van de twee structuren het beste kan worden gebruikt in de experimentele opstelling.

Een andere keuze waarvoor specifiek een nomo-mathematisch model moet worden opgesteld, is de keuze of er moet worden gewerkt in de Andreev- of de tunneling-limiet (Blonder *et al.*, 1982; Andreev, 1964). Dit heeft te maken met de interface tussen de supergeleider en het normale metaal. Grofweg kan worden gesteld dat dit te maken heeft met hoe gemakkelijk de elektronen van de supergeleider over kunnen gaan naar het normale metaal. Van beide opties zijn voor- en nadelen te bedenken (Melin, 2005), maar in welke mate deze verschillende voor- en nadelen meewegen, kan alleen via een nomo-mathematisch model worden bepaald.

Er is op bepaalde plaatsen in het onderzoek dus heel duidelijk een rol te vinden voor nomo-mathematische modellen. Toch blijkt dat veel redenaties over het opzetten van het experiment niet op het niveau van de wiskunde worden gedaan. Hierbij wordt veel meer gedacht in termen van entiteiten met capaciteiten, wat in mechanistische modellen een belangrijke rol speelt.

Nomo-mathematische en mechanistische modellen zijn nauw aan elkaar verbonden en hebben veel invloed op elkaar. De reden waarom ze zo nauw verbonden met elkaar zijn is dat ze beide een ander soort wetenschappelijke verklaring geven. Zoals ik in hoofdstuk 1 heb uitgewerkt, kunnen we twee soorten wetenschappelijke verklaringen onderscheiden. Ten eerste zijn dit verklaringen in termen van algemene wetten; ten tweede zijn dit verklaringen op basis van causaliteit (zie paragraaf 1.3). We kunnen deze twee soorten verklaringen zien als complementair. Zoals Wesley Salmon het op basis van de filosofie van Peter Rail-

ton (Railton, 1981) beschrijft, belichten ze allebei een ander deel van een ideale verklarende tekst. De wetenschappelijke verklaringen in termen van algemene wetten worden gegeven door nomo-mathematische modellen. Wetenschappelijke verklaringen op basis van causaliteit worden gegeven door mechanistische modellen. Beide soorten modellen zijn dus complementair en sterk aan elkaar verbonden. Diagrammatische en experimentele modellen hebben niet tot doel het geven van verklaringen. Zij representeren echter wel 'iets' en zijn in die zin verklarend. Hieronder zal ik achtereenvolgens de diagrammatische en de experimentele modellen verder uitwerken.

4.3 Diagrammatische modellen

De volgende soort modellen die ik zal bespreken zijn diagrammatische modellen. Dit soort modellen staat dichter bij instrumenten dan de mechanistische modellen die ik in de vorige paragraaf heb besproken.

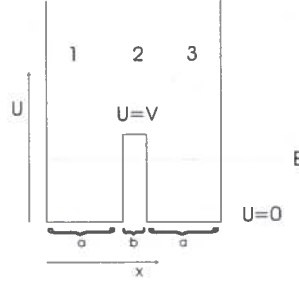
Diagrammatische modellen danken hun naam aan het feit dat ze als representatief gereedschap een diagram of grafisch schema gebruiken (Boon, 2006b). In een diagrammatisch model is een belangrijke plaats weggelegd voor randvoorwaarden. Door het bepalen van deze randvoorwaarden, kunnen diagrammatische modellen twee belangrijke functies vervullen. Ten eerste kunnen via deze weg het nomo-mathematische en mechanistische model verder uitgewerkt worden. Ten tweede is het door het bepalen van deze randvoorwaarden mogelijk het mechanistische en nomo-mathematische model te koppelen aan metingen.

Een bekend voorbeeld van het gebruik van diagrammatische modellen in de kwantummechanica is het bepalen van de golf functie van een deeltje in een bepaalde potentiaal. Er kan voor verschillende regio's wiskundig worden bepaald wat de golf functie in dit gebied is. Vervolgens kunnen via het diagrammatische model de randvoorwaarden van deze golf functie worden opgesteld. Deze randvoorwaarden zijn in het geval van het deeltje in een potentiaalput gebaseerd op het idee dat de golf functie continu en differentieerbaar moet zijn.

Een mogelijke golf functie in een potentiaal die we tegenkomen in de kwantummechanica is de golf functie van een deeltje in een dubbele potentiaalput. Hieronder zal ik het diagrammatische model dat bij deze situatie hoort bespreken. Een belangrijk onderdeel van dit diagrammatische model is de grafische weergave van deze situatie, te vinden in figuur 4.1. Middels deze grafische weergave, is het mogelijk de randvoorwaarden van de golf functie te bepalen. Dit bepalen van de randvoorwaarden van deze golf functie zal ik hieronder bespreken. Een uitgebreidere wiskundige uitwerking hiervan is ook te vinden in paragraaf 5.2.2.

In dit diagrammatische model bevindt een deeltje met energie E , $0 < E < V$ zich in een potentiaal van de vorm (zie ook figuur 5.1:

- Op $x \leq -(a + \frac{1}{2}b)$, is de potentiaal $U = \infty$
- In regio 1, $-(a + \frac{1}{2}b) < -x < \frac{1}{2}b$, is de potentiaal $U = 0$
- In regio 2, $-\frac{1}{2}b < x < \frac{1}{2}b$, is de potentiaal $U = V$
- In regio 3, $\frac{1}{2}b < x < a + \frac{1}{2}b$, is de potentiaal $U = 0$



Figuur 4.1: Dubbele potentiaalput met een deeltje met energie E

- Op $x \geq a + \frac{1}{2}b$, is de potentiaal $U = \infty$

In iedere regio kan nu de golfvergelijking worden bepaald, door het oplossen van de tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking. In hoofdstuk 5 zal ik uitgebreider bespreken hoe dit wordt gedaan. Hieronder zal ik alleen de resultaten hiervan geven.

In regio 1 is de golfvergelijking van de vorm:

$$\psi = Ae^{ikx} + Be^{-ikx} \quad \text{met } k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (4.1)$$

In regio 2 is de golfvergelijking van de vorm:

$$\psi = Ce^{qx} + De^{-qx} \quad \text{met } q = \frac{\sqrt{2m(E - V)}}{\hbar} \quad (4.2)$$

In regio 3 is de golfvergelijking van de vorm:

$$\psi = Ee^{ikx} + Fe^{-ikx} \quad \text{met } k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (4.3)$$

De constanten A, B, C, D, E, F, q en k kunnen worden bepaald door het gedrag van de golf functies op de grenzen van de verschillende regio's te bestuderen. Hiervoor worden in het diagrammatische model verschillende randvoorwaarden opgesteld. Hierin wordt gesteld dat deze golfvergelijkingen moeten voldoen aan de voorwaarden van continuïteit en differentieerbaarheid op de grenzen tussen de verschillende regio's en dus:

$$\psi_{\text{links}} = \psi_{\text{rechts}} \quad \frac{d\psi_{\text{links}}}{dx} = \frac{d\psi_{\text{rechts}}}{dx} \quad (4.4)$$

Dit leidt tot de volgende 8 vergelijkingen:

$$\begin{aligned} Ae^{ikx} + Be^{-ikx} &= 0 & \text{voor } x = -(a + \frac{1}{2}b) \\ ikAe^{ikx} - ikBe^{-ikx} &= 0 & \text{voor } x = -(a + \frac{1}{2}b) \\ Ae^{ikx} + Be^{-ikx} &= Ce^{qx} + De^{-qx} & \text{voor } x = -\frac{1}{2}b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
ikAe^{ikx} - ikBe^{-ikx} &= qCe^{qx} - qDe^{-qx} & \text{voor } x = -\frac{1}{2}b \\
Ce^{qx} + De^{-qx} &= Ee^{ikx} + Fe^{-ikx} & \text{voor } x = \frac{1}{2}b \\
qCe^{qx} - qDe^{-qx} &= ikEe^{ikx} - ikFe^{-ikx} & \text{voor } x = \frac{1}{2}b \\
Ee^{ikx} + Fe^{-ikx} &= 0 & \text{voor } x = a + \frac{1}{2}b \\
ikEe^{ikx} - ikFe^{-ikx} &= 0 & \text{voor } x = a + \frac{1}{2}b
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Door het oplossen van dit stelsel vergelijkingen, dat voortkomt uit de randvoorwaarden uit het diagrammatische model, kunnen de waarden voor A, B, C, D, E, F, k, q bepaald worden.

Het diagrammatische model dat ik hierboven heb besproken bestaat uit verschillende componenten. Ten eerste bestaat het uit het diagram dat te vinden is in figuur 4.1; ten tweede bestaat het uit de verschillende randvoorwaarden en hun uitwerking die worden opgesteld voor de golf functies in de verschillende regio's.

Zoals ik aan het begin van deze paragraaf heb uitgewerkt, is een belangrijke functie van het diagrammatische model dat het ons in staat stelt het nomomathematische model verder uit te werken. In bovenstaand voorbeeld gebeurt dit doordat het diagrammatische model ons in staat stelt de golf functies nader te bepalen. Deze kunnen vervolgens verder gebruikt worden in het nomomathematische model.

Een tweede functie van het diagrammatische model die ik aan het begin van deze paragraaf heb besproken, is dat het het mechanistische en nomomathematische model koppelt aan experimenten. De manier waarop het diagrammatische model uit dit voorbeeld deze functie vervult is door het bepalen van de precieze golf functies. Hierdoor is het namelijk mogelijk het kwadraat van deze golf functies te bepalen en hiermee de waarschijnlijkheid dat een deeltje zich op een bepaalde plaats bevindt. Deze kennis kan getoetst worden middels experimenten.

Bovenstaand voorbeeld illustreert dus goed hoe het diagrammatische model kan worden voorgesteld en hoe het zijn functies vervult. Het diagrammatische model brengt de verschillende soorten modellen steeds meer in contact met instrumenten en experimenten. Een laatste soort model dat ik zal behandelen, en dat het dichtst bij instrumenten ligt, is het experimentele model.

4.4 Experimentele modellen

Experimentele modellen zijn van de vier soorten modellen de soort modellen waarin instrumenten de grootste rol spelen. In deze experimentele modellen wordt de opstelling die in het experimentele onderzoek wordt gebruikt gemodelleerd. Hierbij wordt ten eerste de werking van het instrument weergegeven; ten tweede worden de interacties tussen instrument en entiteit uitgewerkt. Het doel hiervan is te verduidelijken wat en hoe er in het experiment wordt getest.

Bij het opzetten van dit soort modellen wordt gebruik gemaakt van kennis uit het mechanistische model.

Bij het opzetten van het kwantummechanische experiment uit hoofdstuk 3, wordt gebruik gemaakt van verschillende experimentele modellen.

Deze experimentele modellen bestaan ten eerste uit een schematische weergave van de experimentele opstelling die kan worden gebruikt in het experiment. Voorbeelden van deze schematische weergaven die werden gebruikt in hoofdstuk 3 bij het opzetten van het experiment naar entanglement, zijn te vinden in figuur 4.2.

Een tweede onderdeel van deze experimentele modellen is kennis over wat er in deze experimentele opstellingen precies gebeurt. Deze kennis is gebaseerd op de kennis die wordt opgedaan uit de mechanistische modellen uit paragraaf 4.1. In het geval van het experiment naar entanglement uit hoofdstuk 3 is dit dus kennis over:

- dat elektronen entangled kunnen zijn
- dat er entanglede elektronenparen in een supergeleider voorkomen
- dat deze elektronenparen door Andreev reflectie over kunnen gaan naar een normaal metaal zonder hun entanglement te verliezen
- dat de elektronen in een elektronenpaar bij meting tegengestelde spintoe-standen hebben en dat uit metingen hiervan dus kan worden afgeleid of de elektronen inderdaad entangled waren

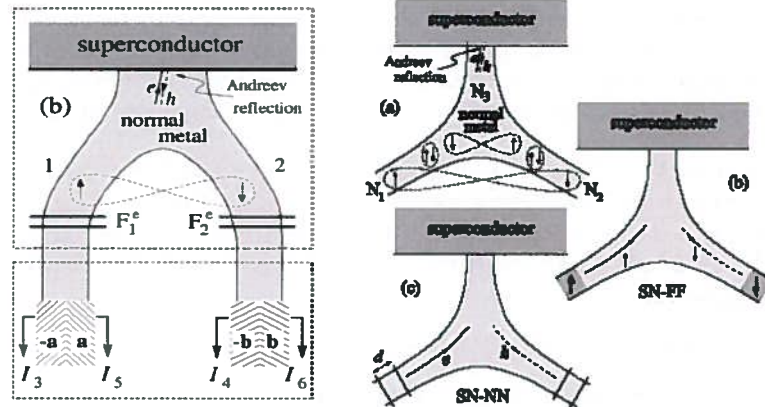
Verder wordt in het experimentele model ook de interactie tussen instrument en entiteit gemodelleerd. Een voorbeeld hiervan dat we tegenkomen in het experiment naar entanglement is de externe potentiaal die over het metaal wordt gezet. Het doel hiervan is dat de elektronen onder invloed van deze potentiaal door het metaal zullen gaan bewegen richting het eind van de leads. Hierbij wordt gebruik gemaakt van kennis over de capaciteit van elektronen dat ze onder invloed van een potentiaal richting de positieve pool van deze potentiaal zullen gaan bewegen. Ze vertonen deze capaciteit omdat ze de eigenschap hebben dat ze lading bezitten.

In dit voorbeeld is duidelijk te zien hoe het experimentele model wordt gebruikt. Door de grafische voorstelling en het idee wat er in het experiment gebeurt, is het mogelijk het experiment op te zetten en te zien wat er op welke manier wordt getest.

4.5 Conclusie

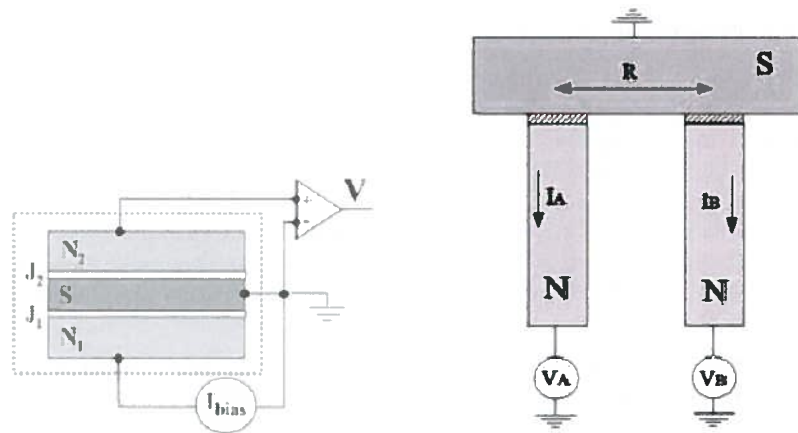
In het afgelopen hoofdstuk heb ik laten zien in welke mate en vorm de verschillende soorten modellen een rol spelen in het onderzoek naar entanglement.

Door te analyseren welke modellen een rol spelen in het onderzoek is het nu mogelijk om te kijken of we te maken hebben met een Bohrs experiment. Hierbij zal ik allereerst in hoofdstuk 5 het nomo-mathematische model van entanglement analyseren. Vervolgens zal ik in hoofdstuk 6 vanuit de kant van het experiment dezelfde vraag proberen te beantwoorden.



(a) Experimenteel model van een vork-
structuur. Overgenomen uit: (Chelkatchev *et al.*, 2002)

(b) Experimenteel model van een vork-
structuur waarin verschillende splitters opgenomen
zijn. Overgenomen uit: (Lesovik *et al.*, 2001)



(c) Experimenteel model van een lagen-
structuur. Hierbij is een supergeleider geplaatst
tussen twee normaal-metalen leads. Overge-
nomen uit: (Russo *et al.*, 2005)

(d) Experimenteel model van een lagen-
structuur. Hierbij is een supergeleider geplaatst
op twee normaal-metalen leads. Overgenomen
uit: (Bignon *et al.*, 2004)

Figuur 4.2: Voorbeelden van experimentele modellen

Deel II

Testen in hoeverre causaal
redeneren elimineerbaar is
in het opzetten van
kwantummechanische
experimenten

Inleiding

In de eerste vier hoofdstukken van mijn scriptie heb ik een wetenschapsfilosofisch kader uiteengezet, waarbinnen ik mijn onderzoek zal plaatsen en interpreteren. Hierbij heb ik allereerst in hoofdstuk 1 het probleem van causaliteit uiteengezet, zoals dit is uitgewerkt door David Hume. Vervolgens heb ik in datzelfde hoofdstuk de verschillende visies op de rol van causaliteit in natuurwetenschappelijke verklaringen uitgewerkt. Aan de ene kant kan hierbij worden gesteld dat causaliteit een metafysische notie lijkt te zijn waardoor we de rol van causaliteit in de natuurwetenschappen moeten proberen te minimaliseren. Aan de andere kant spelen causale redentaties zo'n grote rol in ons dagelijks leven dat het tegenintuïtief lijkt te zijn dit soort redentaties niet in de natuurwetenschappen toe te passen. Er zijn om deze reden twee tradities ontstaan. De eerste traditie, waarin het logisch positivisme een belangrijke rol heeft gespeeld, stelt dat we ons in de natuurwetenschappen puur op verklaringen in termen van algemene wetten moeten richten. De tweede traditie stelt dat we ons in de natuurwetenschappen moeten richten op het vinden van causale verklaringen.

In hoofdstuk 2 heb ik me beziggehouden met de vraag welke verschillende soorten kennis we kunnen onderscheiden in natuurwetenschappelijke experimenten. Deze vraag heb ik onderverdeeld in twee deelvragen: ten eerste kunnen we ons afvragen welke soorten kennis te onderscheiden zijn in de aard van de kennis; ten tweede kunnen we ons bezighouden met de vraag welke soorten kennis te onderscheiden zijn in het toepassingsbereik van de kennis. Hierbij kwamen twee ideeën naar voren die een belangrijke rol zullen gaan spelen in het verloop van mijn scriptie. Ten eerste is dit het idee van de Bohrse experimenten, zoals gedefinieerd door Rom Harré. In dit soort experimenten kan er geen ontologisch onderscheid gemaakt worden tussen apparaat en wereld. Om deze reden kunnen we uit dit soort experimenten alleen kennis opdoen over het apparaat-wereldcomplex; 'back-inference' naar kennis over de wereld is hierbij niet mogelijk.

Een tweede belangrijk idee is de visie over entiteiten met capaciteiten van Nancy Cartwright. Cartwright stelt dat Bohr gelijk heeft dat algemene wetten die worden afgeleid uit Bohrse experimenten alleen geldig zijn binnen het apparaat-wereldcomplex. Ze stelt echter dat niet algemene wetten, maar capaciteiten de meest fundamentele eigenschappen van de wereld zijn. Volgens Cartwright's visie, bezitten objecten bepaalde capaciteiten, oftewel bepaalde "abilities, tendencies and propensities to do" (Cartwright, 1999, p. 64). Uit Bohrse experimenten (of, zoals Cartwright het noemt, experimenten waarbij gebruik wordt gemaakt van nomologische machines), kan volgens Cartwright dus wel kennis over de capaciteiten van entiteiten worden opgedaan. Op deze manier verkrijgen we dus kennis over het causale gedrag van de entiteit.

Als we kijken naar de visie van Harré, kan worden gesteld dat deze nauw verbonden is met het idee van verklaringen in termen van algemene wetten. Hierbij benadert hij de experimentele structuur als een black-box. Om deze reden kan de kennis die wordt afgeleid uit het experiment alleen geldig zijn binnen het apparaat-wereldcomplex.

Het idee van Cartwright staat dicht bij het idee van causale verklaringen. Hierbij wordt gedacht in termen van entiteiten met capaciteiten en spelen causale relaties dus een veel belangrijkere rol. Om deze reden wordt de expe-

rimentele structuur niet benaderd als Bohrs apparaat. Kennis die uit dit soort experimenten wordt afgeleid, kan dus wel algemenere geldigheid hebben.

In hoofdstuk 3 heb ik een natuurkundige beschrijving gegeven van het opzetten van een natuurwetenschappelijke experiment, waarin gebruik makend van supergeleiding wordt getest of entanglement optreedt bij elektronenparen. Dit natuurwetenschappelijke experiment heb ik gebruikt als casestudy in mijn wetenschapsfilosofische onderzoek. In hoofdstuk 4 heb ik uitgewerkt welke modellen in dit experimentele onderzoek naar entanglement een rol spelen. Dit is gebaseerd op hoofdstuk 2, waarbij ik een onderscheid heb gemaakt tussen nomo-mathematische, mechanistische, diagrammatische en experimentele modellen.

In de komende twee hoofdstukken zal ik me vanuit dit wetenschapsfilosofische kader gaan bezighouden met de hoofdvraag van mijn scriptie:

Is causaal redeneren (i.e. het redeneren op basis van entiteiten met capaciteiten) elimineerbaar in kwantummechanische experimenten?

Ik zal deze vraag via twee verschillende wegen proberen te beantwoorden.

In hoofdstuk 5 zal ik deze hoofdvraag via de theoretische kant benaderen. Hierbij zal ik me bezighouden met de vraag of er in de wiskundige afleiding van entanglement causale redematies voorkomen of dat deze afleiding zuiver deductief verloopt. Als de afleiding zuiver deductief verloopt, geeft dit ons aanwijzingen dat het experimentele onderzoek naar entanglement gezien kan worden als een Bohrs experiment. In dit geval wordt het apparaat namelijk benaderd als een black-box. Als er causale redematies in de wiskundige inleiding terug te vinden zijn, geeft dit ons aanwijzingen dat we hierbij niet te maken hebben met een Bohrs experiment. In dit geval wordt er namelijk geredeneerd over entiteiten met capaciteiten die zich in het apparaat bevinden.

In hoofdstuk 6 zal ik deze hoofdvraag via de experimentele kant benaderen. Hierbij zal ik me bezighouden met de vraag in hoeverre we dit experiment kunnen zien als een Bohrs experiment. Harré stelt dat het niet mogelijk is een ontologisch onderscheid te maken tussen apparaat en wereld. Om deze reden benadert hij het instrument als een black-box. Causale redematies over wat er in het instrument gebeurt spelen hierbij geen rol. In hoofdstuk 6 zal ik voor het experiment uit hoofdstuk 3 analyseren in hoeverre causale redematies hierin inderdaad elimineerbaar zijn.

Hoofdstuk 5

Is causaal redeneren elimineerbaar?: Een wiskundige benadering

In de eerste drie paragrafen van dit hoofdstuk zal ik een wiskundige afleiding van entanglement geven. Vervolgens zal ik me in paragraaf 5.4 bezighouden met een wetenschapsfilosofische reflectie hierop, waarbij ik me zal richten op de vraag of er causale redematies te vinden zijn in deze wiskundige afleiding of dat de afleiding zuiver deductief is. In de wiskundige afleiding van entanglement zal ik beginnen vanuit de achtergrond van de klassieke mechanica en van hieruit richting entanglement werken.

Als we aan de klassieke mechanica denken, denken we vaak aan de bewegingswetten die Newton heeft opgesteld. Deze gingen uit van krachten tussen objecten waaruit de snelheid en versnelling van deze objecten kon worden berekend. Er is echter ook een klassiek formalisme, dat niet met krachten, maar met energieën werkt. Hierbij wordt een energiebalans van een bepaald systeem opgesteld, waaruit de snelheid en versnelling van de verschillende objecten kan worden bepaald. Belangrijke personen in de ontwikkeling van dit formalisme waren Joseph Louis Lagrange en William Rowan Hamilton. Zij stelden respectievelijk een Lagrangiaan en een Hamiltoniaan op, die de som is van alle energieën die een rol spelen in het systeem.

De methode van Newton en de methode van Lagrange en Hamilton leveren dezelfde resultaten op en zijn dus empirisch equivalent. Ze gebruiken alleen een ander soort wiskunde om tot hun resultaten te komen.

Het werken met energieën in plaats van krachten lijkt bij simpele systemen overbodig ingewikkeld. Als we echter werken met complexere systemen, blijkt het werken met energieën veel gemakkelijker dan met krachten. In de kwantummechanica speelt de Hamiltoniaan van een systeem een centrale rol.

5.1 De Schrödingervergelijking

Aan het begin van de 20^e eeuw begon men met de ontwikkeling van de kwantummechanica. Een belangrijk punt hierin was de postulering van de Schrödingervergelijking door Erwin Schrödinger in 1925 (Wikipedia, 2006b). Erwin Schrödinger was gespecialiseerd in theorie van klassieke golven en verbond deze kennis met nieuwe inzichten die aan het eind van de 19^e en begin van de 20^e eeuw in de natuurkunde verkregen waren. Deze achtergrondkennis speelde een cruciale rol in het postuleren van zijn Schrödingervergelijking. Hieronder zal ik de belangrijkste inzichten bespreken die Schrödinger hebben geleid tot het opstellen van zijn beroemde vergelijking.

In de kwantummechanica neemt de Hamiltoniaan een belangrijke plaats in. Deze Hamiltoniaan is de som van de energieën die een rol spelen in het systeem. We kunnen de systemen die we beschouwen in de microwereld zien als gesloten systemen. Er wordt namelijk geen warmte toegevoegd of arbeid gedaan op het systeem. Hierdoor is de Hamiltoniaan de som van de kinetische en de potentiële energie en heeft dus de volgende vorm:

$$\begin{aligned} H &= E \\ &= T + V \\ &= \frac{1}{2}mv^2 + V \\ &= \frac{p^2}{2m} + V \end{aligned} \quad (5.1)$$

Een belangrijk idee in de kwantummechanica is dat energie gekwantiseerd is. Dit inzicht is verkregen op basis van verschillende experimenten. Op basis van deze ideeën van kwantisatie van energie werden de volgende twee empirische generalisaties opgesteld:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k \quad (5.2)$$

Bovenstaande formule is opgesteld door Louis de Broglie. In deze formule is mooi de golf-deeltjesdualiteit van de kwantummechanica te herkennen. Een impuls is een capaciteit die we vaak aan een deeltje toekennen. De golflengte λ en het golfgetal k zijn capaciteiten die we vaak aan een golf toekennen. Bovenstaande formule geeft dus een relatie tussen deze golf- en deeltjeseigenschappen.

Een tweede empirische generalisatie is opgesteld door Max Planck:

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad (5.3)$$

Deze vergelijking geeft een relatie weer tussen de energie van een deeltje en zijn frequentie. De evenredigheidconstante h wordt de constante van Planck genoemd en wordt beschouwd als een fundamentele natuurconstante.

Bovenstaande twee empirische generalisaties hebben een belangrijke rol gespeeld in het onderzoek van Erwin Schrödinger. Verder spelen in zijn theorie operatoren een belangrijke rol. In de wiskunde werkte men al regelmatig met operatoren. Het gebruik hiervan als representatie van fysische grootheden was echter

iets volkomen nieuws. Schrödinger gebruikte twee operatoren¹:

$$\begin{aligned} p &\propto \nabla \\ E &\propto \frac{\partial}{\partial t} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Bovenstaande operatoren kunnen op functies werken, bijvoorbeeld de golf-functie Ψ . De operatoren 5.4 kunnen nu worden ingevuld in formule 5.1. Vervolgens kunnen we de evenredigheidsconstanten op basis van experimentele en theoretische kennis invullen en kunnen we de operatoren laten werken op de golf-functie Ψ . Hieruit volgt de beroemde Schrödingervergelijking:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}, t) \right] \Psi(\vec{r}, t) \quad (5.5)$$

5.1.1 De tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking

Bij het oplossen van de Schrödingervergelijking wordt vaak gebruik gemaakt van de wiskundige methode van scheiding van variabelen. Hierbij wordt aangenomen dat de potentiaal V onafhankelijk is van de tijd. In onderstaande uitwerking zal ik bovendien aannemen dat de potentiaal eendimensionaal is. Dit is geen voorwaarde, maar maakt de berekening aanzienlijk gemakkelijker. De Schrödingervergelijking krijgt nu de volgende vorm:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x) \right] \Psi(x, t) \quad (5.6)$$

Bovenstaande vergelijking is op te lossen door middel van de methode van scheiding van variabelen als het mogelijk is de golf-functie te schrijven als een product van een functie van x en een functie van t , oftewel:

$$\Psi(x, t) = \psi(x)f(t) \quad (5.7)$$

zodat:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \psi(x) \frac{df(t)}{dt} \quad \frac{\partial \Psi}{\partial x} = f(t) \frac{d\psi(x)}{dx} \quad (5.8)$$

Uit 5.7 en 5.8 volgt dat de Schrödingervergelijking als volgt kan worden geschreven:

$$i\hbar \psi(x) \frac{df(t)}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m} f(t) \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + V \psi(x) f(t) \quad (5.9)$$

Door deling door ψf volgt dat:

$$i\hbar \frac{1}{f} \frac{df}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{\psi} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + V \quad (5.10)$$

De linkerkant van de vergelijking is nu alleen afhankelijk van de tijd t . De rechterkant is alleen afhankelijk van de plaatscoördinaat x . Beide delen kunnen

¹Hierbij is $\propto$ het wiskundige symbool voor 'is evenredig met'

alleen aan elkaar gelijk zijn als ze beide gelijk zijn aan dezelfde constante en dus:

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{1}{f} \frac{df}{dt} &= E \\ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{\psi} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V &= E \end{aligned} \quad (5.11)$$

De eerste van deze twee vergelijkingen is gemakkelijk op te lossen en geeft als resultaat:

$$f(t) = e^{-iEt/\hbar} \quad (5.12)$$

De oplossing van de tweede vergelijking is afhankelijk van de vorm van de potentiaal V . Om deze reden richt zich men in de kwantummechanica vaak op het oplossen van de tweede vergelijking. Dit wordt de tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking genoemd:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi = E\psi$$

(5.13)

5.2 Superpositie

5.2.1 Wiskundig

Het principe van superpositie is een wiskundig principe waar veel gebruik van wordt gemaakt in de lineaire algebra. De Wikipedia encyclopedie zegt hierover het volgende:

“In linear algebra, the principle of superposition states that, for a linear system, a linear combination of solutions to the system is also a solution to the same linear system. The superposition principle applies to linear systems of algebraic equations, linear differential equations, or systems of linear differential equations.” (Wikipedia, 2006k)

Een simpel voorbeeld van de toepassing van dit superpositieprincipe is het oplossen van de volgende differentiaalvergelijking:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -k^2\psi \quad (5.14)$$

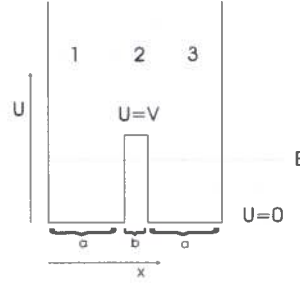
Deze differentiaalvergelijking speelt een belangrijke rol in de kwantummechanica. De tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking kan namelijk in deze vorm geschreven worden, met $k = \frac{\sqrt{2m(E-V)}}{\hbar}$.

Als we ervan uitgaan dat k een reëel getal is, voldoen de volgende formules aan de differentiaalvergelijking 5.14:

$$\begin{aligned} \psi &= A \sin kx \\ \psi &= B \cos kx \end{aligned} \quad (5.15)$$

De algemene oplossing van de vergelijking is nu de superpositie van beide formules:

$$\psi = A \sin kx + B \cos kx \quad (5.16)$$



Figuur 5.1: Dubbele potentiaalput met één deeltje met energie E

5.2.2 Fysisch

Het principe van superpositie lijkt in eerste instantie een puur wiskundig principe. De superpositie die wiskundig wordt voorspeld, blijkt echter ook experimenteel aangetroffen te worden. Een deeltje kan zich namelijk in een superpositie van toestanden bevinden. Een belangrijk experiment hierbij is Youngs experiment (zie paragraaf 3.1). Uit dit experiment blijkt dat een deeltje zich in een superpositie kan bevinden en zo als het ware door beide spleten tegelijk kan gaan. Hierdoor kan het met zichzelf interfereren. Om te begrijpen hoe we tot dit fysische idee van superpositie komen, zal ik het voorbeeld dat wordt weergegeven in figuur 5.1 wiskundig uitwerken. Hierbij bevindt een deeltje met energie E , $0 < E < V$ zich in een potentiaal van de vorm (zie ook figuur 5.1:

- Op $x \leq -(a + \frac{1}{2}b)$, is de potentiaal $U = \infty$
- In regio 1, $-(a + \frac{1}{2}b) < -x < \frac{1}{2}b$, is de potentiaal $U = 0$
- In regio 2, $-\frac{1}{2}b < x < \frac{1}{2}b$, is de potentiaal $U = V$
- In regio 3, $\frac{1}{2}b < x < a + \frac{1}{2}b$, is de potentiaal $U = 0$
- Op $x \geq a + \frac{1}{2}b$, is de potentiaal $U = \infty$

In iedere regio kan nu de golfvergelijking worden bepaald, door het oplossen van de tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi = E\psi \quad (5.17)$$

Deze kan omgeschreven worden naar de volgende vorm:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -k^2\psi \quad (5.18)$$

met $k = \frac{\sqrt{2m(E-U)}}{\hbar}$.

In regio 1 is k een reëel getal, omdat $E > U = 0$ en dus is de algemene oplossing van vergelijking 5.18 van de vorm:

$$\psi = Ae^{ikx} + Be^{-ikx} \quad \text{met } k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (5.19)$$

In regio 2 is k een complex getal, omdat $E < U = V$ en dus is de algemene oplossing van vergelijking 5.18 in deze regio van de vorm:

$$\psi = Ce^{qx} + De^{-qx} \quad \text{met } q = \frac{\sqrt{2m(E-V)}}{\hbar} \quad (5.20)$$

In regio 3 is k weer een reëel getal, gelijk aan de k in regio 1 en is de oplossing van 5.18 weer van de vorm:

$$\psi = Ee^{ikx} + Fe^{-ikx} \quad \text{met } k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (5.21)$$

Er gelden voor deze vergelijkingen de voorwaarden van continuïteit en differentieerbaarheid op de grenzen tussen de verschillende regio's en dus:

$$\psi_{\text{links}} = \psi_{\text{rechts}} \quad \frac{d\psi_{\text{links}}}{dx} = \frac{d\psi_{\text{rechts}}}{dx} \quad (5.22)$$

Middels deze randvoorwaarden kunnen de waarden voor A , B , C , D , E , F , k , q bepaald worden. Vervolgens kan het kwadraat van de golf functie ψ op het domein $-(a + \frac{1}{2}b) < x < a + \frac{1}{2}b$ berekend worden. Dit kwadraat van de golf functie geeft de waarschijnlijkheid weer dat een deeltje zich op een bepaalde plaats bevindt. Er blijkt dat een deeltje in een lage energietoestand de grootste kans heeft zich in het midden van regio 1 of in het midden van regio 3 te bevinden. Om deze reden kan de waarschijnlijkheidscurve benaderd worden door twee deltafuncties op deze twee verschillende plaatsen. Door deze benadering is te concluderen dat het deeltje twee mogelijke posities heeft waar het zich kan bevinden, plaats a en plaats b . Door gebruik te maken van het principe van superpositie, kan nu worden gesteld dat het deeltje zich in een superpositie van deze twee posities bevindt:

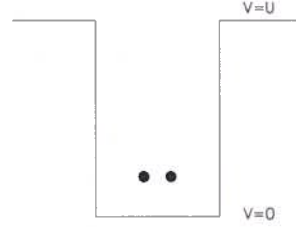
$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{plaats } a\rangle \pm |\text{plaats } b\rangle) \quad (5.23)$$

Hierbij is de $\frac{1}{\sqrt{2}}$ een normalisatieconstante die er zorgt dat de totale waarschijnlijkheid 1 is.

Dit idee van superpositie is vervolgens uit te breiden naar andere gevallen waarin een deeltje zich in twee of meerdere toestanden kan bevinden. Een voorbeeld hiervan is de spin van een deeltje, die up of down kan zijn. Ook hierbij kan geconcludeerd worden dat een deeltje zich in een superpositie van beide spintoestanden kan bevinden. Deze superpositie van spintoestanden speelt een belangrijke rol in het onderzoek naar spin-entanglement.

5.3 Entanglement

Entanglement kan worden gezien als het fenomeen dat de toestand van een deeltje afhankelijk is van de toestand van een ander deeltje. Tot nu toe hebben we gekeken naar systemen van één deeltje. Hieronder zal ik systemen van twee deeltjes behandelen om tot het principe van entanglement te komen. Eerst zal ik naar het geval kijken dat twee deeltjes in een potentiaalput geen interactie met elkaar hebben. Daarna zal ik het geval bespreken waarin ze wel interactie met elkaar hebben, wat uiteindelijk zal leiden tot een idee van entanglement.



Figuur 5.2: Potentiaalput

5.3.1 Twee deeltjes in een potentiaalput zonder interactie

Hieronder zal ik het voorbeeld bespreken van twee deeltjes in een potentiaalput van de vorm die weergegeven is in figuur 5.2. In deze paragraaf zal ik aannemen dat deze twee deeltjes geen interactie met elkaar hebben. Om de toestanden waarin de twee deeltjes zich kunnen bevinden te berekenen, kunnen we een Hamiltoniaan opstellen van het systeem, die vervolgens kan worden ingevuld in de Schrödingervergelijking. Deze Hamiltoniaan heeft de volgende vorm:

$$\begin{aligned} H &= T + V \\ H &= T_1 + T_2 = -\frac{\hbar^2}{2m_1} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} - \frac{\hbar^2}{2m_2} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Hierbij is de potentiaal $V=0$, omdat de twee deeltjes zich in een potentiaalput met $V=0$ bevinden en geen interactie met elkaar hebben. Als we deze Hamiltoniaan nu in de Schrödingervergelijking invullen, krijgen we het volgende resultaat:

$$\begin{aligned} H\psi &= E\psi \\ -\frac{\hbar^2}{2m_1} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \psi - \frac{\hbar^2}{2m_2} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \psi &= E\psi \end{aligned} \quad (5.25)$$

Deze vergelijking is op te lossen door middel van de methode van scheiding van variabelen. Hierbij zoeken we naar oplossingen van de vorm:

$$\Psi(x_1, x_2) = \psi(x_1)\psi(x_2) \quad (5.26)$$

Hieruit volgt dat:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_1^2} = \psi(x_2) \frac{d^2 \psi(x_1)}{dx_1^2} \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_2^2} = \psi(x_1) \frac{d^2 \psi(x_2)}{dx_2^2} \quad (5.27)$$

Door 5.27 in te vullen in 5.25 krijgen we de volgende vergelijking:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_1} \psi(x_2) \frac{d^2 \psi(x_1)}{dx_1^2} - \frac{\hbar^2}{2m_2} \psi(x_1) \frac{d^2 \psi(x_2)}{dx_2^2} = E\psi(x_1)\psi(x_2) \quad (5.28)$$

Door bovenstaande vergelijking te delen door $\psi(x_1)\psi(x_2)$ krijgen we nu de volgende herschreven vorm van de Schrödingervergelijking:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_1} \frac{1}{\psi(x_1)} \frac{d^2 \psi(x_1)}{dx_1^2} - \frac{\hbar^2}{2m_2} \frac{1}{\psi(x_2)} \frac{d^2 \psi(x_2)}{dx_2^2} = E \quad (5.29)$$

We hebben nu twee termen. De eerste is alleen afhankelijk van x_1 , de tweede alleen van x_2 . De som hiervan is alleen constant als beide termen constant zijn en dat dus geldt:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_1} \frac{1}{\psi(x_1)} \frac{d^2\psi(x_1)}{dx_1^2} = E_1 \quad -\frac{\hbar^2}{2m_2} \frac{1}{\psi(x_2)} \frac{d^2\psi(x_2)}{dx_2^2} = E_2 \quad (5.30)$$

Deze twee vergelijkingen kunnen worden omgeschreven naar de volgende vorm:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\psi(x_1)}{dx_1^2} &= -\frac{2mE}{\hbar^2} \psi(x_1) = -k_1^2 \psi(x_1) \\ \frac{d^2\psi(x_2)}{dx_2^2} &= -\frac{2mE}{\hbar^2} \psi(x_2) = -k_2^2 \psi(x_2) \end{aligned} \quad (5.31)$$

Waarbij $k_1 = \frac{\sqrt{2mE_1}}{\hbar}$ en $k_2 = \frac{\sqrt{2mE_2}}{\hbar}$. De oplossingen van deze twee vergelijkingen worden nu:

$$\begin{aligned} \psi(x_1) &= Ae^{ik_1x} + Be^{-ik_1x} & \text{met } k_1 &= \frac{\sqrt{2mE_1}}{\hbar} \\ \psi(x_2) &= Ae^{ik_2x} + Be^{-ik_2x} & \text{met } k_2 &= \frac{\sqrt{2mE_2}}{\hbar} \end{aligned} \quad (5.32)$$

Uit bovenstaande kunnen we concluderen dat als twee deeltjes geen interactie met elkaar hebben, de Schrödingervergelijking door scheiding van variabelen opgelost kan worden. De golf functie van het systeem kan dus worden geschreven als het product van de golf functies van haar afzonderlijke delen:

$\Psi(x_1, x_2) = \psi(x_1)\psi(x_2)$

(5.33)

Hierbij is de golf functie van het ene deeltje is niet afhankelijk van de golf functie van het andere deeltje. De deeltjes kunnen nu als losse delen worden beschouwd en er is geen entanglement.

5.3.2 Twee deeltjes in een potentiaalput met interactie

Dat twee deeltjes geen interactie met elkaar hebben is een geïdealiseerd voorbeeld, dat in de praktijk niet veel voorkomt. Door eigenschappen als bijvoorbeeld massa en lading, zullen krachten tussen de twee deeltjes een rol gaan spelen. Een voorbeeld hiervan is de Coulombkracht tussen geladen deeltjes. Als de twee deeltjes interactie met elkaar hebben, moet er een extra term in de Hamiltoniaan opgenomen worden die deze interactie weergeeft. Hieronder zal ik het voorbeeld uitwerken van twee geladen deeltjes in de 1-dimensionale potentiaalput uit figuur 5.2. Hierbij bestaat de interactieterm dus uit een Coulombkracht en krijgt de Schrödingervergelijking de volgende vorm:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_1} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} - \frac{\hbar^2}{2m_2} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + U(x_1, x_2) + V \right] \Psi = E\Psi \quad (5.34)$$

Hierbij is de potentiaal $V = 0$, omdat de twee deeltjes zich in de potentiaalput uit figuur 5.2 bevinden; $U(x_1, x_2)$ is de Coulombinteractie:

$$U(x_1, x_2) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0(x_1 - x_2)^2} \quad (5.35)$$

Belangrijk hierbij op te merken is, dat deze interactieterm afhankelijk is van zowel x_1 als x_2 .

We kunnen nu vergelijking 5.34 op dezelfde wijze proberen op te lossen als in de vorige paragraaf: door middel van scheiding van variabelen. We krijgen nu, door gebruik te maken van 5.26 en 5.27, de volgende vergelijking:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_1}\psi(x_2)\frac{d^2\psi(x_1)}{dx_1^2} - \frac{\hbar^2}{2m_2}\psi(x_1)\frac{d^2\psi(x_2)}{dx_2^2} + U(x_1, x_2)\psi(x_1)\psi(x_2) = E\psi(x_1)\psi(x_2) \quad (5.36)$$

Door deling van beide kanten door $\psi(x_1)\psi(x_2)$:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_1}\frac{1}{\psi(x_1)}\frac{d^2\psi(x_1)}{dx_1^2} - \frac{\hbar^2}{2m_2}\frac{1}{\psi(x_2)}\frac{d^2\psi(x_2)}{dx_2^2} + U(x_1, x_2) = E \quad (5.37)$$

Het is echter niet mogelijk deze vergelijking op te splitsen in twee delen, waarvan de eerste alleen afhankelijk is van x_1 en de tweede alleen van x_2 . De reden hiervoor is dat de interactieterm $U(x_1, x_2)$ niet te schrijven is als een product van twee onafhankelijke interactietermen $U_1(x_1)U_2(x_2)$, omdat U de volgende vorm heeft:

$$U(x_1, x_2) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0(x_1^2 - x_2^2 - 2x_1x_2)} \quad (5.38)$$

We moeten dus concluderen dat het niet mogelijk is deze Schrödingervergelijking op te lossen middels scheiding van variabelen en dat dus geldt:

$\Psi(x_1, x_2) = \psi_1(x_1, x_2)\psi_2(x_1, x_2)$

(5.39)

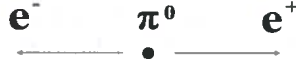
De toestand van het ene deeltje is hierbij dus afhankelijk van de toestand van het andere deeltje. In de volgende paragraaf zal ik dit principe gebruiken in het bespreken van de potentiaal uit figuur 5.1. Dit leidt ons uiteindelijk tot het principe van entanglement.

De density matrix

Een methode waarop vergelijking 5.34 wel kan worden opgelost is door middel van een density matrix. Ik zal hier niet wiskundig uitwerken hoe dit precies werkt, maar wel wat haar wiskundige consequenties zijn.

Als we kijken naar de potentiaal weergegeven in figuur 5.1, kunnen we concluderen dat het deeltje zich (over het algemeen) ofwel in het midden van regio 1, plaats a, bevindt, ofwel in het midden van regio 3, plaats b (zie ook paragraaf 5.2.2). Als we nu twee deeltjes x en y hebben, hebben we de volgende mogelijkheden:

$$|x, y\rangle = \frac{1}{2}(|aa\rangle + |ab\rangle + |ba\rangle + |bb\rangle) \quad (5.40)$$



Figuur 5.3: Pionverval: een pion vervalt in een electron en een positron

Als er interactie tussen deze twee plaatsvindt, worden bepaalde van bovenstaande mogelijkheden waarschijnlijker of minder waarschijnlijk. De precieze waarden van deze waarschijnlijkheden zijn te bepalen door middel van de density matrix.

Een mogelijke uitkomst is dat de kans op de toestanden $|aa\rangle$ en $|bb\rangle$ verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de kans op de toestanden $|ab\rangle$ en $|ba\rangle$. Dit is het geval als twee deeltjes door het Pauli-uitsluitingsbeginsel zich niet in dezelfde energietoestand kunnen bevinden. De toestand van de twee deeltjes kan nu als volgt worden weergegeven:

$$|x, y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|ab\rangle + |ba\rangle) \quad (5.41)$$

Hieruit is te concluderen dat de deeltjes x en y zich in een superpositie bevinden van de toestand dat x zich op positie a bevindt en y op plaats b en de toestand dat y zich op positie a bevindt en x op positie b . Hierbij is de toestand van deeltje x dus afhankelijk van de toestand van deeltje y . Dit wordt entanglement genoemd en wordt op de volgende manier weergegeven:

$$|a\rangle_x \otimes |b\rangle_y \quad \text{en} \quad |b\rangle_y \otimes |a\rangle_x \quad (5.42)$$

Als we nu een meting uitvoeren op deeltje x , verandert zijn toestand in één van de mogelijke toestanden. Hierdoor wordt de superpositie van het systeem opgeheven en na meting bevindt dus ook deeltje y zich niet meer in deze superpositie. Een meting op deeltje x beïnvloedt dus de toestand van deeltje y .

5.3.3 Spin-entanglement

In bovenstaande heb ik het voorbeeld besproken van twee deeltjes waarvan hun positie entangled is. Het is ook mogelijk dat twee deeltjes entangled zijn in spin. Deze spin-entanglement speelt een belangrijke rol in het experiment beschreven in hoofdstuk 3.

Een voorbeeld van spin-entanglement treedt op bij de vervalreactie van een pion naar een elektron en een positron. Dit pionverval is te vinden in figuur 5.3. Een pion heeft spin 0; een elektron en positron hebben beide spin $1/2$. Door het principe van spinbehoud is het fysisch alleen mogelijk dat het ene deeltje spin up heeft en het andere spin down. De deeltjes bevinden zich dus in een superpositie van beide toestanden:

$$|e^-, e^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_{e^-} \downarrow_{e^+}\rangle \pm |\downarrow_{e^-} \uparrow_{e^+}\rangle) \quad (5.43)$$

Op het moment dat we een meting uitvoeren op het elektron, vervalt hiermee de superpositie en leggen we dus meteen de toestand van het positron vast. De entanglement is dus als volgt:

$$|\uparrow\rangle_{e^-} \otimes |\downarrow\rangle_{e^+} \quad \text{en} \quad |\uparrow\rangle_{e^+} \otimes |\downarrow\rangle_{e^-} \quad (5.44)$$

Entanglement kan tegenintuïtieve consequenties hebben als we kijken naar een entangled elektron en positron die een bepaalde afstand van elkaar verwijderd zijn. Meting aan het ene deeltje beïnvloedt op dat moment *instantaan* de toestand van het andere deeltje. Dit gaat in tegen ons begrip van causaliteit, dat stelt dat hiervoor een deeltje met informatie overgestuurd moet worden die maar met een eindige snelheid kan reizen.

5.4 Wetenschapsfilosofische reflectie

In deze paragraaf zal ik me bezighouden met de vraag of er in de wiskundige afleiding van entanglement causale redenties voorkomen of dat deze afleiding zuiver deductief verloopt. Zoals ik op pagina 78 heb uitgewerkt, zou het zuiver deductief verlopen van de wiskundige afleiding van entanglement ons aanwijzingen geven dat het experimentele onderzoek uit hoofdstuk 3 kan worden gezien als een Bohrs experiment. Als er causale redenties in de wiskundige afleiding terug te vinden zijn, geeft dit ons aanwijzingen dat we hierbij niet te maken hebben met een Bohrs experiment.

In mijn wetenschapsfilosofische onderzoek ben ik een drietal plaatsen tegengekomen waarop de wiskundige afleiding van entanglement niet deductief verloopt. Dit zal ik hieronder verder uitwerken.

5.4.1 Het toekennen van fysische betekenis aan de verschillende variabelen

Zoals ik heb uitgewerkt in hoofdstuk 2, verwachten we wetenschapsfilosofisch dat in het nomo-mathematische model van de kwantummechanica de ongeïnterpreteerde axioma's en algemene wetten uit de theorie worden toegepast op meer specifieke situaties. Om dit mogelijk te maken moet er allereerst fysische betekenis worden toegekend aan de verschillende variabelen in de theorie. Dit zou dus de eerste niet-deductieve stap zijn in de wiskundige afleiding. Via deze niet-deductieve stap beginnen we dingen te beschrijven als entiteiten met eigenschappen. Beschreven de formules eerst alleen het gedrag variabelen, nu beschrijven ze het gedrag van een entiteit aan de hand van haar eigenschappen. Door fysische betekenis toe te kennen aan de verschillende variabelen is het vervolgens mogelijk specifieke fysische situaties te beschrijven.

Als we kijken naar de Schrödingervergelijking (formule 5.5), kunnen we stellen dat er in het nomo-mathematische model van de kwantummechanica fysische interpretaties worden gegeven van de variabelen m , $\vec{r}$ (als we maar naar 1 dimensie kijken, is dit x), t en V . Hierbij wordt m fysisch geïnterpreteerd als de massa, $\vec{r}$ of x als de plaats, t als de tijd en V als de potentiële energie. Een andere belangrijke fysische variabele die we tegenkomen bij het uitwerken van de Schrödingervergelijking is E , de energie.

Op basis van deze fysische interpretatie is te concluderen dat in het nomo-mathematische model van de kwantummechanica een entiteit wordt beschreven die de eigenschap heeft dat hij een bepaalde massa, plaats, energie en potentiële energie op een bepaald tijdstip heeft.

Vervolgens is het mogelijk deze kennis toe te passen op een specifieke fysische situatie. Een voorbeeld hiervan is te vinden in paragraaf 5.3.1. In deze

paragraaf passen we de theoretische kennis toe op de fysische (geïdealiseerde) situatie dat twee deeltjes zich in een potentiaalput bevinden en geen interactie met elkaar hebben. Deze twee deeltjes worden beschreven in termen van de fysische parameters die ik hierboven heb genoemd: hun massa, plaats, energie en potentiële energie op een bepaald tijdstip. Een ander voorbeeld is dat van twee deeltjes in een potentiaalput die wel interactie met elkaar hebben, zoals ik heb beschreven in paragraaf 5.3.2. De wiskundige beschrijving van de toestand van deze twee deeltjes laat ons zien dat de toestand van het ene deeltje afhankelijk is van de toestand van het andere deeltje. Dit leidt ons uiteindelijk tot het idee van entanglement.

Een belangrijke plaats in de kwantummechanica wordt ingenomen door de potentiële energie. In kwantummechanisch onderzoek draait het er vaak om een potentiële energie V te vinden die een goede beschrijving geeft van het systeem dat wordt bestudeerd. Door het invullen van de potentiële energie in de Schrödingervergelijking, kan vervolgens kennis worden verkregen over het gedrag en de toestand van het kwantumsysteem. Wetenschapsfilosofisch neemt de potentiële energie een interessante plaats in, omdat zij niet eigenschappen, maar potentiële eigenschappen van een entiteit beschrijft. In de komende paragraaf zal ik dit verder uitwerken.

5.4.2 Het toepassen op een specifieke situatie: de potentiaalterm

In de afgelopen paragraaf heb ik besproken hoe we via het toekennen van fysische betekenis aan de verschillende parameters, gaan denken in termen van entiteiten met eigenschappen. Volgens Nancy Cartwright, kunnen we echter beter stellen dat deeltjes niet eigenschappen maar capaciteiten hebben. De term capaciteiten heeft een bredere betekenis dan eigenschap. Het bevat niet alleen eigenschappen, maar ook eigenschappen die we alleen vertonen in specifieke situaties. Zoals Nancy Cartwright het beschrijft: capaciteiten zijn “abilities, tendencies and propensities to do” (Cartwright, 1999, p. 64) (zie ook paragraaf 2.2.2).

Een fysisch concept dat bijna exemplarisch lijkt te zijn voor capaciteiten is de potentiële energie. Deze potentiële energie speelt een belangrijke rol in de kwantummechanica. Hieronder zal ik eerst uitleggen wat er in de natuurkunde wordt verstaan onder potentiële energie. Daarna zal ik de rol van de potentiële energie in de kwantummechanica verder uitwerken.

In de natuurkunde wordt de energie van een entiteit opgedeeld in interne en externe energie. Onder externe energie verstaat men bijvoorbeeld arbeid die op het systeem wordt uitgeoefend, of warmte die aan het systeem wordt toegevoegd. Omdat in de microwereld systemen kunnen worden beschouwd als gesloten systemen, speelt alleen interne energie hierin een rol. De Hamiltoniaan uit de kwantummechanica heeft dus alleen termen die voortkomen uit de interne energie van het systeem.

Onder interne energie wordt de som van de kinetische en de potentiële energie verstaan. Kinetische energie is direct afhankelijk van de massa en de snelheid van een entiteit. Potentiële energie is een ingewikkelder concept. Dit wordt door de Wikipedia Encyclopedie als volgt gedefinieerd:

“Potential energy is energy that is “captured” in an object, with the potential to be released. There are various different types of potential energy. Many of these - such as gravitational, elastic, or electrical potential energy - arise from the relative positions or configurations of objects. The potential energy may then be defined as the work that must be done against a particular force - in these examples, gravitational, electrical or elastic force - so as to achieve that configuration. Chemical potential energy is slightly different, at least in its macroscopic manifestation: it is the energy that is available for release from chemical reactions (for example, by burning a fuel).” (Wikipedia, 2006h)

Zoals uit bovenstaand citaat blijkt, kan potentiële energie fysisch worden gezien als een energie die opgesloten ligt in een object en potentieel kan worden ‘losgelaten’. Bij het ‘loslaten’ van deze energie wordt de potentiële energie omgezet in kinetische energie. Een andere manier om tegen de potentiële energie aan te kijken is dat het de arbeid is die moet worden verricht om de beweging als gevolg van een bepaalde kracht tegen te gaan. Afhankelijk van het systeem kunnen verschillende krachten, zoals bijvoorbeeld de zwaartekracht of de elektromagnetische kracht, hierbij een rol spelen.

Een simpel voorbeeld van een situatie waarin een entiteit potentiële energie heeft is het volgende: Een man staat op een berg. Fysisch kunnen we stellen dat hij nu een potentiële energie heeft ter grootte van mgh , waarbij m zijn massa is, g de zwaartekrachtsconstante en h de hoogte boven de grond waarop hij zich bevindt. Op het moment dat hij zich van deze berg laat vallen, wordt zijn potentiële energie omgezet in kinetische energie. De kracht die in dit geval door de potentiële energie moet worden tegengegaan is dus de zwaartekracht. Als we deze fysische situatie koppelen aan het idee van capaciteiten van Nancy Cartwright, kunnen we concluderen dat de man dus de capaciteit heeft dat als hij zich een bepaalde afstand boven de grond bevindt, zijn natuurlijke beweging naar beneden zal zijn. De reden waarom hij in dit geval niet naar beneden valt, is omdat hij op een berg staat.

Een ander voorbeeld van potentiële energie die relevanter is voor de kwantummechanica is dat van twee geladen deeltjes die elkaar afstoten. De potentiële energie is hierbij tegengesteld aan de elektromagnetische kracht tussen de deeltjes en heeft dus de waarde: $V = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$, waarbij wordt aangenomen dat de deeltjes te benaderen zijn als puntdeeltjes met lading q . In dit geval hebben deze twee geladen deeltjes dus de capaciteit om elkaar aan te trekken. Een geladen deeltje vertoont deze capaciteit alleen op het moment dat er een ander geladen deeltje in de buurt is.

Zoals te zien is in paragraaf 5.1, 5.2 en 5.3, speelt de potentiaalterm in de Schrödingervergelijking een essentiële rol. Deze potentiaalterm bevat alle systeemspecifieke informatie over het kwantumsysteem; alle andere termen in de Schrödingervergelijking staan vast. Door het oplossen van deze Schrödingervergelijking met ingevulde potentiaalterm, is het mogelijk kennis te krijgen over de toestand van het kwantumsysteem.

Een voorbeeld van een potentiaalterm is te vinden in paragraaf 5.2.2, waarbij de potentiaal een externe potentiaal is van de vorm weergegeven in figuur 5.1.

Een ander voorbeeld is te vinden in paragraaf 5.3.2, waarbij de potentiaal de Coulomb-afstoting van de twee geladen deeltjes weergeeft:

$$U(x_1, x_2) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0(x_1 - x_2)^2} \quad (5.45)$$

In het opstellen van het nomo-mathematische model van het systeem moet dus gekeken worden naar de fysische omstandigheden waarin het kwantumsysteem zich bevindt. Vervolgens kan er op basis van de capaciteiten van de verschillende entiteiten in het systeem worden beslist welke potentiaaltermen een rol spelen in het kwantumsysteem. Mogelijke potentiaaltermen zijn bijvoorbeeld: de aantrekking tussen positief en negatief geladen deeltjes, de afstoting tussen negatief geladen deeltjes, de zwaartekracht, of de invloed van een externe potentiaal.

Bij het opstellen van het nomo-mathematisch model van een specifiek kwantummechanisch systeem, moet er niet alleen worden gekeken naar welke potentiaaltermen een bijdrage kunnen leveren. Er moeten ook keuzes worden gemaakt welke potentiaaltermen in het model worden meegenomen en welke verwaarloosd worden. Hierbij is het aan de ene kant belangrijk om een goede beschrijving te kunnen geven van de werkelijkheid. Dit is te bereiken door zoveel mogelijk termen aan de potentiaal toe te voegen. Aan de andere kant kan de vergelijking niet meer wiskundig worden opgelost als er te veel potentiaaltermen worden meegenomen. Er moet hier dus een middenweg worden gevonden.

In het toepassen van de theorie op een specifieke fysische situatie blijkt de potentiaalterm dus een essentiële rol te spelen. Dit is de tweede niet-deductieve stap die te onderscheiden is in het afleiden van entanglement. Hierbij wordt er expliciet geredeneerd in termen van entiteiten met capaciteiten, zoals wetenschapsfilosofisch beschreven is door Nancy Cartwright. Om entanglement te vinden tussen twee deeltjes, moet er een interactieterm tussen deze twee deeltjes in de potentiaalterm zitten. Deze interactie zorgt ervoor dat de toestand van het ene deeltje afhankelijk is van de toestand van het andere deeltje, wat het basisprincipe vormt van entanglement.

5.4.3 Het overgaan naar een andere wiskundige notatie: de Dirac-notatie

Ik heb tot nu toe op twee verschillende punten niet-deductieve stappen gevonden in de wiskundige afleiding van entanglement: bij het toekennen van fysische betekenis aan de verschillende variabelen in de theorie en bij het opstellen van een nomo-mathematische beschrijving van een specifiek kwantumsysteem. Een derde punt waarop we mogelijk niet-deductieve stappen kunnen vinden is in de wiskundige notatie zelf.

Deze niet-deductieve stap is te vinden in het overgaan naar de Dirac-notatie. Deze overgang is essentieel als er door interacties mengtermen in de potentiaal voorkomen. Hierdoor is het niet meer mogelijk de Schrödingervergelijking op basis van de methode van scheiding van variabelen op te lossen, zoals bijvoorbeeld in paragraaf 5.3.1 werd gedaan. Er moeten nu wiskundig ingewikkelder methodes worden toegepast die leiden tot een density matrix (zie paragraaf 5.3.2). De density matrix is een matrix die de statistische toestand van een

kwantumsysteem beschrijft (Wikipedia, 2006a). Bij de beschrijving van deze density matrix wordt er gebruik gemaakt van de Dirac-notatie. Deze Dirac-notatie wordt gebruikt vanaf paragraaf 5.3.2, en is ook te vinden in formule 5.23.

Om het mogelijk te maken over te gaan op de Dirac-notatie, worden een aantal stappen doorlopen. Ten eerste wordt er niet meer gekeken naar de golf-functie, maar naar haar kwadraat. Omdat het kwadraat van de golf-functie een waarschijnlijkheid weergeeft dat een deeltje zich in een bepaalde toestand op een bepaald tijdstip bevindt, is het mogelijk hieruit een waarschijnlijkheidscurve te verkrijgen. Ten tweede wordt er een idealisatie van deze waarschijnlijkheidscurve uitgevoerd: er wordt gesteld dat deze curve te benaderen is door één of meerdere deltafuncties. Hierdoor kan met zekerheid worden gesteld dat het deeltje zich in één van deze mogelijke toestanden bevindt.

De Dirac-notatie ligt veel dichter bij onze ervaring dan de notatie die ik aan het begin van dit hoofdstuk heb gebruikt. In deze Dirac-notatie geeft $|\rangle$ weer dat we kijken naar een bepaalde toestand van het systeem. Mogelijke toestanden zijn bijvoorbeeld: de entiteit bevindt zich op plaats x of heeft spin up/down. In de Dirac-notatie wordt er dus veel meer geredeneerd op basis van entiteiten met capaciteiten.

Het overgaan naar de Dirac-notatie en het beschrijven van het systeem door middel van een density matrix, is essentieel in de afleiding van entanglement. Uit de density matrix is namelijk te bepalen met welke waarschijnlijkheid iedere combinatie van mogelijke toestanden op zal treden. Er wordt nu een idealisatie gebruikt dat bepaalde combinaties van toestanden zo onwaarschijnlijk zijn dat ze verwaarloosbaar zijn.

Omdat nu een aantal combinaties van mogelijke toestanden afvallen, is het in specifieke gevallen mogelijk dat als we de toestand van de ene entiteit weten, we de toestand van de andere entiteit met zekerheid ook weten. Dit is duidelijk te zien in formules 5.40 en 5.41; dit wordt het principe van entanglement genoemd.

In het experimentele onderzoek naar entanglement dat ik heb beschreven in hoofdstuk 3 wordt er gekeken naar spin-entanglement van twee elektronen. De Dirac-notatie die deze situatie weergeeft ziet er als volgt uit:

$$|\uparrow\downarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle \pm |\downarrow\uparrow\rangle) \quad (5.46)$$

Oftewel:

$$|\uparrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle \quad \text{en} \quad |\downarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle \quad (5.47)$$

Uit bovenstaande vergelijkingen blijkt duidelijk dat er hierbij wordt geredeneerd op basis van entiteiten met capaciteiten/eigenschappen. In het onderzoek zoals beschreven in hoofdstuk 3 richtten we ons er hierbij op dat elektronen de eigenschap hebben dat ze spin hebben.

5.5 Conclusie

Er zijn dus drie verschillende punten aan te wijzen waar in de wiskundige af-leiding van entanglement geredeneerd wordt op basis van entiteiten met capa-

citeiten. Ten eerste is dit bij het opstellen van het nomo-mathematische model, waarbij men uitgaat van entiteiten met eigenschappen zoals massa en energie. Ten tweede is dit bij het opstellen van de potentiële energie van het systeem. Dit is het duidelijkste voorbeeld van redeneren op basis van entiteiten met capaciteiten. Ten derde is dit bij de niet-deductieve stappen in de afleiding van entanglement, waarbij overgegaan wordt van de gewone notatie naar de Dirac-notatie en de density matrix, waaruit in specifieke gevallen entanglement volgt.

Omdat we op drie punten redeneren in termen van entiteiten met capaciteiten hebben gevonden, lijkt het vanuit deze wiskundige benadering in ieder geval minder waarschijnlijk dat we te maken hebben met een Bohrs experiment. In het komende hoofdstuk zal ik deze zelfde vraag proberen te beantwoorden, alleen nu vanuit een experimentele benadering.

Hoofdstuk 6

Is causaal redeneren elimineerbaar?: Een experimentele benadering

6.1 Twee verschillende soorten van onderzoek doen

Omdat de kwantummechanica intuïtief moeilijk te begrijpen is, is men vanaf de ontwikkeling van deze theorie bezig geweest met haar interpretatie. Er zijn inmiddels een groot aantal interpretaties hiervoor ontwikkeld, die allemaal een bepaald mechanisme onderliggend aan de kwantummechanica uitwerken. Al deze interpretaties zijn voor zover men weet empirisch equivalent, waardoor het niet mogelijk is een keuze te maken tussen de verschillende mechanismen. Om deze reden is er door een deel van de natuurkundigen en filosofen voor gepleit in de kwantummechanica niet langer in termen van een mechanisme denken. Eerst was de reden hiervoor epistemologisch: er is geen manier om tussen de verschillende mechanismen te onderscheiden en het ene mechanisme boven het andere te verkiezen. Later werd de reden van sommige onderzoekers meer ontologisch: er is geen mechanisme onderliggend aan de kwantummechanica. Hoewel het natuurkundig onderzoek in beide gevallen hetzelfde kan zijn, is er een belangrijk verschil in hoe de kwantummechanica in beide gevallen door onderzoekers wordt benaderd.

Het wel of niet denken in termen van een mechanisme hangt samen met de vraag of er in het onderzoek gebruik wordt gemaakt van een mechanistisch model of niet. In het mechanistische model worden er capaciteiten aan de entiteiten toegerekend en speelt causaliteit een belangrijke rol. Zo kan er bijvoorbeeld in het experiment beschreven in hoofdstuk 3 in termen van capaciteiten over elektronen worden gedacht. Hierbij wordt aan de elektronen onder andere de capaciteit toegeschreven dat ze onder invloed van een spanning van de min- naar de plus-pool van deze spanning zullen bewegen. Hierdoor zullen ze richting het einde van de lead stromen, waar metingen worden uitgevoerd die testen of er elektronen tegelijk aan het eind van de leads aankomen.

Er is echter ook een mogelijkheid om niet in termen van mechanismen te denken. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat het niet mogelijk is kennis te hebben over wat er in het apparaat gebeurt en wordt dit apparaat als een black-box beschouwd. Een experiment levert nu als uitkomst correlaties op. Deze correlaties kunnen we in een nomo-mathematisch model beschrijven, maar we kunnen er geen causale consequenties aan verbinden. Als we kijken naar het voorbeeld van het gedrag van elektronen onder invloed van een spanning, kunnen we hier ook over denken zonder te denken in termen van mechanismen. We kunnen bijvoorbeeld het gedrag van een metaal bestuderen, dat een netto negatieve lading heeft. Als we hierover een spanning zetten, kunnen we meten dat het metaal bij de pluspool negatiever geladen wordt dan bij de minpool. Hierbij kunnen we niet concluderen dat dit wordt veroorzaakt door de spanning, maar wel dat er een correlatie bestaat.

Er zijn dus twee verschillende soorten denkwijzen te onderscheiden die kunnen worden gebruikt in kwantummechanisch onderzoek. Beide denkwijzen kunnen wel dezelfde experimentele resultaten opleveren. Het is namelijk in beide gevallen mogelijk een nomo-mathematisch model op te stellen uit de kennis die we in het experiment hebben opgedaan. Als er wordt gedacht in termen van een mechanisme, spelen ook andere soorten modellen een rol.

6.2 Het apparaat-wereldcomplex

6.2.1 Bohrse apparaten

De twee verschillende denkwijzen die ik hierboven heb beschreven, zijn dus gebaseerd op het onderscheid of er in causale termen wordt gedacht of alleen in termen van correlaties. Als we alleen denken in termen van correlaties, kan het experiment worden gezien als een Bohrs experiment. De definitie van Bohrse experimenten is geïntroduceerd door Rom Harré. Hij definieert Bohrse experimenten als experimenten waarbij gebruik wordt gemaakt van een instrument dat noch in causale, noch in ontologische relatie staat met de wereld (zie paragraaf 2.2.1).

Harré heeft zijn Bohrse apparaten genoemd naar de bekende Deense natuurkundige Niels Bohr (1885-1962). Bohr was samen met Heisenberg de grondlegger van de Kopenhageninterpretatie van de kwantummechanica (Faye, 2002). De naam 'Kopenhageninterpretatie' is pas achteraf aan deze interpretatie van Heisenberg en Bohr gegeven. Opmerkelijk is dat beide natuurkundigen het juist niet eens waren over hoe de kwantummechanica precies moest worden geïnterpreteerd. Zij zagen hun visies dan ook niet als een gemeenschappelijke interpretatie. Ik zal nu kort de visie van Bohr bespreken waarop Harré zijn naamgeving heeft gebaseerd.

Bohr hechtte veel belang aan experimenten. Hij stelde dat in de kwantummechanica een nieuw aspect van het observatieprobleem naar voren komt. Observatie is hierbij context-afhankelijk. Er is geen ontologisch verschil meer te maken tussen het apparaat en het object waaraan gemeten wordt.

Bohr stelt dat klassieke concepten als bijvoorbeeld massa en snelheid alleen idealisering zijn. Ze gaan namelijk uit van een wereld die eigenschappen in zichzelf heeft, terwijl we alleen eigenschappen aan een object in combinatie met een experimentele opstelling kunnen toeschrijven. Dit is het concept dat Harré

gebruikt in zijn definitie van Bohrse apparaten: We kunnen alleen kennis opdoen van het object in combinatie met een experimentele opstelling en niet over het object zelf.

Zoals besproken in paragraaf 2.2.2 heeft Cartwright een definitie gegeven van nomologische machines die vergelijkbaar is met de definitie van Bohrse apparaten door Rom Harré. Er is echter een belangrijk verschil in hun denken over dit soort apparaten. In tegenstelling tot Harré denkt Cartwright namelijk wel mechanistisch. Cartwright stelt dat theorieën die worden afgeleid uit experimenten met nomologische machines alleen geldig zijn binnen deze nomologische machines. Volgens haar kan er echter ook kennis over de wereld afgeleid worden uit dit soort experimenten. Het soort kennis over de wereld dat volgens Cartwright afgeleid kan worden uit experimenten is kennis over capaciteiten (zie ook 2.2.2). Harré stelt dat er geen enkele kennis over de wereld uit Bohrse experimenten kan worden afgeleid.

Het is dus de vraag of we in dit experiment te maken hebben met een Bohrs apparaat waarin de experimentele opstelling gezien kan worden als black-box, of dat causaal redeneren een onmisbare rol speelt in kwantummechanische experimenten. Om deze vraag te kunnen beantwoorden zullen we eerst de definitie van een Bohrs apparaat verder bestuderen.

6.2.2 Drie verschillende noties van een Bohrs apparaat

Als we nauwkeuriger kijken naar het idee van Bohrse apparaten, blijkt dat we hier vanuit verschillende invalshoeken naar kunnen kijken. We kunnen ons namelijk drie verschillende vragen stellen, die alledrie verbonden lijken te zijn met het idee van Bohrse experimenten.

Kort samengevat wordt er door Harré gesteld dat er in het apparaat-wereldcomplex fenomenen gecreëerd worden. Experimenten met Bohrse apparaten leveren ons alleen kennis op over de fenomenen binnen deze apparaat-wereldcomplexen. Een voorbeeld dat Harré hiervan uitwerkt zijn de experimenten die worden gedaan met de deeltjesversneller in Cern. Met deze deeltjesversneller heeft men experimenten uitgevoerd waarbij men het W-deeltje heeft 'waargenomen'. Volgens de definitie van Bohrse experimenten, gegeven door Harré, kunnen we uit deze experimenten alleen concluderen dat het W-deeltje in dit apparaat-wereldcomplex bestaat. We kunnen hierbij geen uitspraken doen over of het ook in de wereld bestaat.

De eerste vraag die hierbij gesteld kan worden heeft te maken met het realisme/antirealismedebat. Hierbij kunnen we ons afvragen of de theoretische entiteit, zoals het W-deeltje, die gecreëerd wordt in het apparaat-wereldcomplex, in de wereld hierbuiten bestaat. Als we naar de definitie van het apparaat-wereldcomplex kijken, lijkt deze hierover een agnostische visie aan te nemen: we kunnen alleen kennis krijgen over het apparaat-wereldcomplex, niet over de wereld zelf. Harré gaat echter verder in zijn conclusies:

"At the Cern laboratories a huge apparatus/world complex brings certain tracks into existence, which, simplifying, we could imagine are recorded in photosensitive plates. One such set of tracks was lauded as the "discovery of the W particle". There are probably no free W particles in the universe now." (Harré, 2003, p. 30)

Hij gaat er dus vanuit dat dit W-deeltje hoogstwaarschijnlijk niet aanwezig is in het universum.

Een tweede vraag waar we ons mee bezig kunnen houden is de vraag of er een ontologisch onderscheid te maken is tussen het apparaat en de entiteit. In de kwantummechanica speelt deze vraag een belangrijke rol. Als een kwantummechanisch systeem een interactie aangaat met zijn omgeving, komt dit geheel in een toestand van superpositie. In een experiment zal dus altijd het te onderzoeken object samen met de experimentele opstelling beschreven kunnen worden door een superpositie. Om deze reden heeft Niels Bohr gesteld dat er in de kwantummechanica geen ontologisch onderscheid te maken is tussen het apparaat en de te onderzoeken entiteit. Dit kan dus worden gezien als een apparaat-wereldcomplex, zoals Harré dit heeft behandeld. We kunnen ons echter de vraag stellen of er inderdaad in de kwantummechanica geen ontologisch onderscheid te maken is.

Een derde vraag verbonden aan het idee van Bohrse experimenten die we onszelf kunnen stellen is een methodologische: Is er een methode waardoor de kennis uit Bohrse experimenten wél kennis over de wereld kan opleveren? Dit is een vraag waar Hans Radder zich mee bezig heeft gehouden (Radder, 2003). Hij stelt dat:

“performing and understanding experiments depends on a theoretical interpretation of what happens in materially realizing the experimental process.” (Radder, 2003, pp. 164-165)

Volgens zijn visie is het dus niet mogelijk om experimenten uit te voeren zonder voorafgaand theoretisch begrip. Hij stelt bijvoorbeeld dat we moeten weten of we naar een waarschijnlijkheidsverdeling of naar een vast punt zoeken voordat we onze data kunnen interpreteren. Door deze theorie-geladenheid wordt de verkregen kennis contextafhankelijk en lijkt er geen verschil meer te maken tussen entiteit en apparaat. Hans Radder gaat in zijn artikel ‘Technology and Theory in Experimental Science’ op zoek naar methodes om wel kennis te verkrijgen die contextonafhankelijk is. Volgens hem is het mogelijk dit soort contextonafhankelijke kennis te verkrijgen als we de experimentele resultaten ook binnen andere contexten verkrijgen.

In de komende paragraaf zal ik drie verschillende methodes behandelen om meer inzicht te krijgen of we met een Bohrs experiment te maken hebben of niet. Deze drie methodes zijn nauw verbonden met de drie invalshoeken van Bohrse experimenten die ik hierboven behandeld heb.

6.3 Drie testmethodes

In deze paragraaf zal ik drie methodes onderscheiden waarop onderzocht kan worden of we te maken hebben met een Bohrs apparaat. Volgens deze methodes zal ik vervolgens in paragraaf 6.4 testen of het experiment dat ik heb beschreven in hoofdstuk 3 gezien kan worden als een Bohrs experiment.

Bij de eerste van deze methodes kunnen we onderzoeken of we in dit geval te maken hebben met een Bohrs experiment door te kijken naar welke soorten

modellen een rol spelen in het onderzoek. De tweede methode is meer methodologisch en nauw verbonden met de visie van Hans Radder. Hieronder zal ik deze twee methodes verder uitwerken.

In een derde methode zal ik fysische intuïties bespreken over de vraag of we in dit onderzoek met een Bohrs apparaat te maken hebben. Vervolgens zal ik wetenschapsfilosofisch reflecteren op deze intuïties. Deze derde methode zal ik in onderstaande paragraaf niet verder uitwerken. Wel zal ik deze methode in paragraaf 6.4.3 toepassen.

6.3.1 Welke modellen worden er gebruikt?

Als we de achtergrondkennis over modellen (zie hoofdstuk 4) koppelen aan het idee van Bohrse experimenten, is het veel makkelijker te begrijpen waarom Bohrse experimenten niet kunnen leiden tot kennis over de wereld, maar alleen tot kennis over het apparaat-wereldcomplex.

Een Bohrs experiment kunnen we zien als een black-box waaruit experimentele data verkregen kunnen worden. We hebben hierbij geen mechanistische kennis over wat er in deze black-box gebeurt of waarom we bepaalde experimentele data krijgen. Omdat we alleen correlaties verkrijgen uit dit experiment, is het alleen mogelijk hiermee een nomo-mathematisch model te testen of een nomo-mathematisch model op te stellen. Het is in dit geval echter niet mogelijk conclusies te trekken over de vraag of dit nomo-mathematische model alleen voor dit experiment opgaat of dat het algemener geldig is. We hebben nu dus alleen kennis over het apparaat-wereldcomplex verkregen.

Op het moment dat het mogelijk is kennis op te doen over het mechanisme achter deze correlatie, verandert deze situatie. Nu is het mogelijk begrip te krijgen over de oorzaak voor het al dan niet optreden van de correlatie. Dit begrip kan worden verkregen door niet alleen gebruik te maken van een nomo-mathematisch model, maar ook van mechanistische, diagrammatische en experimentele modellen. Door dit extra begrip wordt de verkregen kennis steeds algemener geldig, en is zij niet meer beperkt tot het apparaat-wereldcomplex. De correlatie lijkt nu meer op een causaliteitsrelatie.

Een voorbeeld waarin dit gemakkelijk te zien is, is de manier waarop de ideale gaswet afgeleid is. Hierbij werd in eerste instantie een experiment uitgevoerd waarbij een gas opgesloten wordt in een afgesloten ruimte die kleiner en groter kan worden gemaakt met behulp van een zuiger. Uit dit experiment werd een relatie verkregen tussen de temperatuur, het volume en de druk. Op dat moment wist men alleen dat er een correlatie tussen deze grootheden was, maar niet of er een causaal verband tussen zat. Bovendien kon men geen conclusies trekken over of deze correlatie in andere gevallen, bij andere gassen of andere zuigers, ook zou opgaan. Toen er later door de ontwikkeling van een mechanistisch model meer begrip kwam van de capaciteiten van gassen, bijvoorbeeld van welke capaciteiten het gas moet hebben om een ideaal gas te zijn, kon er in het interpreteren van het experiment behalve van het nomo-mathematische, ook van het mechanistische, diagrammatische en experimentele model gebruik worden gemaakt. Hierdoor konden er algemenere conclusies worden getrokken. Op deze manier is men uiteindelijk tot de ideale gaswet gekomen, waarin wordt gesteld dat de relatie $pV = nRT$ opgaat voor ideale gassen.

Bij het testen of we te maken hebben met een Bohrs experiment, kunnen we dus de vraag stellen of er alleen gebruik wordt gemaakt van een nomo-mathematisch model, of dat ook andere modellen een belangrijke rol spelen. Als we alleen een nomo-mathematisch model gebruiken, dan maakt dit het aannemelijker dat we te maken hebben met een Bohrs experiment. Als we ook mechanistische, diagrammatische en experimentele modellen gebruiken, lijkt het aannemelijker dat we niet te maken hebben met een Bohrs experiment.

6.3.2 Vermijden van circulariteit

De vraag in hoeverre kennis uit experimenten ons kennis over de wereld kan opleveren, is één van de vragen die naar voren komt in 'The Philosophy of Scientific Experimentation' (Radder, 2003). Mieke Boon heeft hier een artikel over geschreven (Boon, 2004), waarin ze haar eigen ideeën over dit onderwerp uitwerkt. Zij maakt, net als Rom Harré, een onderscheid tussen drie soorten wetenschappelijke instrumenten. De drie soorten instrumenten die ze onderscheidt zijn: 'measure', 'model' en 'manufacture':

"Measure is the name of a category of instruments that measure, represent, or detect certain features or parameters of an object, process or natural state. Model is the name of a category of laboratory systems designed to function as a model of either natural or technological objects, processes or systems. Manufacture is the name of a category of apparatus that produce a phenomenon that is either conjectured from a new theory or not theoretically understood as yet." (Boon, 2004)

Boon stelt dat het gebruik van steeds ingewikkeldere instrumenten (deze vallen dus in de categorie 'manufacture') in de wetenschap lastige filosofische vragen heeft opgeleverd. Dit zijn ook de vragen die in 'The Philosophy of Scientific Experimentation' behandeld worden. In dit boek wordt de theorie-geladenheid van experimenten behandeld. Deze theorie-geladenheid levert een probleem op in het interpreteren van het experiment. Als theorie een rol speelt in experimenten, duiken filosofische vragen op zoals de vraag of de kennis die we afleiden uit experimenten wel kennis over de wereld is, of dat deze kennis alleen geldig is binnen de experimentele opzet.

Verschillende filosofen die hebben bijgedragen aan dit door Hans Radder samengestelde boek hebben verschillende oplossingen voor dit probleem gevonden. Davis Baird (zie ook paragraaf 2.1.2) bijvoorbeeld, heeft geconcludeerd dat het mogelijk is om instrumenten te ontwikkelen op basis van enkel ervaringskennis. Hierbij hebben we volgens hem dus geen theoretisch begrip van het instrument nodig (Baird, 2003). Ook Rainer Lange heeft zich met dit probleem bezig gehouden (zie ook paragraaf 2.1.2). Hij maakt een onderscheid tussen recepten en experimentele wetten. Hierbij zijn recepten instructies hoe experimenten kunnen worden uitgevoerd. Doordat experimenten kunnen worden uitgevoerd op basis van deze recepten, concludeert Lange dat het mogelijk is zonder theoretische aannames een experiment op te zetten (Lange, 2003).

De verschillende filosofen in 'Philosophy of Scientific Experimentation' proberen dus allemaal een oplossing te vinden voor het probleem van de theorie-geladenheid van experimenten. Boon stelt in haar artikel dat het probleem van

theorie-geladenheid te vaag is. Volgens haar is de vraag niet of theorie een rol speelt in experimenten, maar of er nog een verschil te maken is tussen de theorie die we onderzoeken (T_T) en de theorie die we gebruiken om de experimenten op te zetten (T_E):

“The role of theory in experiments is two-sided. Experiments are used to test theories (T_T), and theories (T_E) are used to interpret experimental results. Therefore, the problem is not theory-ladenness, but whether *circularity* can be avoided, i.e. whether T_T can be clearly distinguished from T_E .” (Boon, 2004)

Boon stelt dus dat we ons niet moeten richten op de theorie-geladenheid van experimenten maar op de vraag of circulariteit kan worden vermeden. Deze circulariteit kan volgens haar optreden als er geen duidelijk onderscheid te maken is tussen de te testen theorie en de theorie die gebruikt wordt voor het interpreteren van de experimentele resultaten. Op het moment dat deze circulariteit optreedt, is volgens Boon de kennis die we afleiden uit het experiment alleen geldig binnen het apparaat-wereldcomplex. Deze visie geeft dus een tweede methode aan waarop we kunnen onderzoeken of we te maken hebben met een Bohrs experiment.

6.4 Hebben we in het onderzoek naar entanglement te maken met een Bohrs experiment?

6.4.1 Een eerste test: Welke modellen worden gebruikt?

Om te kijken of we te maken hebben met een Bohrs experiment, kunnen we bestuderen welke modellen een rol spelen in het onderzoek. Zoals uitgewerkt in paragraaf 6.3.1 kan een Bohrs experiment geen kennis opleveren over mechanismes. Daarom kan in dit soort experimenten alleen een nomo-mathematisch model getest/opgesteld worden. Om te testen of we te maken hebben met een Bohrs experiment, kan dus de vraag worden gesteld of we in het experiment uit hoofdstuk 3 alleen te maken hebben met nomo-mathematische modellen of dat er ook een rol is weggelegd voor mechanistische, diagrammatische en experimentele modellen.

In hoofdstuk 4 heb ik uitgewerkt welke modellen een rol spelen in het experiment uit hoofdstuk 3. Uit dit hoofdstuk blijkt dat behalve een nomo-mathematisch model ook mechanistische, diagrammatische en experimentele modellen een belangrijke rol spelen in het experiment. Het lijkt vanuit dit oogpunt dus niet waarschijnlijk dat we te maken hebben met een Bohrs experiment.

6.4.2 Een tweede test: Kan circulariteit vermeden worden?

Een tweede manier om te testen of we te maken hebben met een Bohrs experiment is de methode van Mieke Boon die ik heb uitgewerkt in paragraaf 6.3.2. Bij deze methode wordt er gekeken of circulariteit in het experiment vermeden

kan worden. Hiertoe definieert Boon een theorie T_T en een theorie T_E . De theorie T_T is hierbij de theorie die in het experiment getest wordt; de theorie T_E is de theorie die wordt gebruikt om experimentele resultaten te interpreteren. Circulariteit treedt op als T_T en T_E aan elkaar gelijk zijn.

Om volgens deze methode te kijken of het natuurkundig onderzoek dat ik heb beschreven in hoofdstuk 3 een Bohrs experiment is, moeten we dus kijken naar wat de T_T en de T_E in dit geval zijn.

Het doel van het experiment dat ik heb uitgewerkt in hoofdstuk 3 is het testen van Bells ongelijkheden. Als een schending van deze ongelijkheden gemeten wordt, is entanglement en dus non-lokaliteit een intrinsieke eigenschap van de microwereld. Als Bells ongelijkheden niet geschonden worden, wordt geconcludeerd dat het nomo-mathematische model van de kwantummechanica een onvolledige beschrijving van de werkelijkheid is. De theorie die wordt gebruikt om het experiment te interpreteren (T_E) is dus het nomo-mathematische model van de kwantummechanica.

Uit dit nomo-mathematische model volgt het principe dat de toestand van een deeltje afhankelijk kan zijn van de toestand van een ander deeltje. Dit wordt ook wel entanglement genoemd (zie ook hoofdstuk 5). Dit principe van entanglement wordt interessant als we kijken naar twee entangled deeltjes die in de ruimte gescheiden zijn. Als een meting wordt uitgevoerd op het eerste deeltje, vervalt hiermee de superpositie. Hierdoor zou theoretisch gezien de toestand van het tweede deeltje *instantaan* moeten veranderen. Als de deeltjes in de ruimte gescheiden zijn, gaat dit in tegen het principe van causaliteit (zie ook paragraaf 3.3.1).

In het experiment uit hoofdstuk 3 wordt getest of entanglement optreedt bij twee entangled elektronen in opstellingen zoals weergegeven in paragraaf 4.4. In het opzetten van dit experiment wordt kennis gecombineerd van ten eerste deze opstellingen en ten tweede mechanistische modellen over interacties tussen entiteit en omgeving. Hierbij wordt dus een experimenteel model opgesteld. In het experiment wordt vervolgens dit experimentele model getest. De theorie die wordt getest (T_T) is dus het experimentele model, zoals ik dit heb weergegeven in paragraaf 4.4.

Uit bovenstaande blijkt dus dat er geen circulariteit in dit experiment optreedt. Er wordt namelijk een experimenteel model getest, terwijl een nomo-mathematisch model gebruikt wordt om de experimentele resultaten te interpreteren.

Hacking

Uit paragraaf 6.4.1 is dus te concluderen dat niet alleen nomo-mathematische, maar ook mechanistische, diagrammatische en experimentele modellen een belangrijke rol spelen in het opzetten van het experiment uit hoofdstuk 3. In dit opzetten van het experiment wordt dus geredeneerd op basis van entiteiten met eigenschappen/capaciteiten. Een van de eerste wetenschapsfilosofen die zich bezig heeft gehouden met het bestuderen van experimenten en theoretische entiteiten met eigenschappen is Ian Hacking.

Ian Hacking stelt dat bij het opzetten van experimenten in de articulatiefase

de theorie wordt verduidelijkt en zo in verband kan worden gebracht met de empirische praktijk. Volgens hem kan nu worden geconcludeerd dat de theoretische entiteit bestaat als we de causale eigenschappen van deze entiteit kunnen gebruiken om iets anders te manipuleren.

Het idee dat Hacking heeft over het manipuleren komt ongeveer overeen met wat blijkt uit paragraaf 6.3.1: Als we ons alleen bezig zouden houden met het testen van een nomo-mathematisch model, zouden we alleen kennis over correlaties kunnen krijgen. Door te redeneren op basis van entiteiten met capaciteiten, is het mogelijk kennis te krijgen over causale relaties die niet alleen binnen het apparaat-wereldcomplex geldig zijn maar ook hierbuiten. Hacking stelt dat dit extrapoleren van de kennis naar de buitenwereld alleen mogelijk is bij capaciteiten die we kunnen gebruiken om andere dingen te manipuleren.

Een belangrijke vraag die in Hacking's filosofie niet beantwoord wordt, is de vraag hoe we aan kennis over deze causale eigenschappen komen. Deze kennis lijkt namelijk niet direct opgesloten te liggen in de theorie.

Zoals blijkt uit paragraaf 6.4.2, wordt in het experiment uit hoofdstuk 3 niet de theorie (het nomo-mathematische model), maar het experimentele model getest. Hierbij spelen de causale eigenschappen van de entiteiten een belangrijke rol. Hiermee lijkt de vraag die gesteld kan worden bij de filosofie van Hacking dus beantwoord: kennis over causale eigenschappen ligt niet in het nomo-mathematische model, maar wordt afgeleid uit mechanistische, diagrammatische en experimentele modellen die worden opgesteld bij het opzetten van een experiment. Het idee dat ik hierboven heb uitgewerkt, kan dus worden gezien als een verduidelijking en uitbreiding van de filosofie van Ian Hacking.

6.4.3 Een derde test: Natuurkundige en filosofische reflectie

Natuurkundige intuïties

Harré definieert een Bohrs experiment als een experiment dat noch ontologische gelijkenis vertoont met de wereld noch in causale relatie met deze wereld staat. Hij ziet dit soort experiment dus als losstaand van de wereld. Hierbij creëren deze experimenten volgens hem als het ware hun eigen wereld, het apparaat-wereldcomplex.

Harré stelt dat (vrijwel) alle experimenten in de moderne natuurkunde Bohrs experimenten zijn. Volgens hem gaan fysici er vaak van uit dat hun experimenten in ontologische relatie staan met de wereld, terwijl dit eigenlijk niet het geval is. Een voorbeeld dat hij hiervan bespreekt is de deeltjesversneller in Cern (zie ook paragraaf 2.2.1), waarbij natuurkundig onderzoekers aannemen dat ze deeltjes kunnen detecteren die ook buiten de versneller voorkomen.

Hieronder zal ik vanuit natuurkundig perspectief ideeën beschrijven over de vraag of we in het onderzoek uit hoofdstuk 3 te maken hebben met een Bohrs experiment. Vanuit dit perspectief gezien, is het een belangrijke vraag of er wisselwerking is tussen apparaat en wereld, of dat het apparaat geïsoleerd is van de buitenwereld. Als er veel wisselwerking tussen omgeving en experiment is, lijkt het intuïtief minder waarschijnlijk dat we hierbij te maken hebben met een Bohrs experiment. Als het apparaat relatief geïsoleerd is van de buitenwereld, lijkt het waarschijnlijker dat we te maken hebben met een Bohrs experiment en dat de kennis die we uit dit experiment opdoen alleen geldig is binnen het

apparaat-wereldcomplex. Ook de vraag of je kunt aangeven welk deel van het instrument interacties aangaat met de wereld speelt hierbij een rol. Als dit relatief duidelijk aan te geven is, wijst dit erop dat het minder waarschijnlijk is dat we hierbij te maken hebben met een Bohrs experiment.

Allereerst zullen we kort kijken naar het experiment naar entanglement dat Alain Aspect heeft uitgevoerd. Hierbij heeft hij gewerkt met entangled fotonen. Dit zijn massaloze, ladingloze deeltjes die om deze reden weinig interactie hebben met hun omgeving. Ze zijn dus vrijwel geïsoleerd van hun omgeving en zo is intuïtief simpel voor te stellen dat ze zich in een apparaat-wereldcomplex bevinden.

In het op te zetten experiment, beschreven in hoofdstuk 3, is het de bedoeling om te onderzoeken of entanglement ook optreedt bij elektronen. Er zijn drie belangrijke verschillen tussen dit experiment en het experiment van Alain Aspect:

1. Elektronen hebben massa
2. Elektronen hebben lading: tussen geladen deeltjes vindt interactie plaats door middel van de Coulombkracht. Dit is een 'long range'-kracht, omdat ze bij grotere afstanden niet snel uitdooft (de kracht is evenredig met $1/r$ in plaats van, zoals bij veel krachten, evenredig met $1/r^2$ of hogere ordes van r)
3. Het is een veeldeeltjesprobleem: er vindt een koppeling plaats tussen alle deeltjes in het sample

Deze drie factoren zorgen ervoor dat de elektronen meer interacties aangaan met andere entiteiten, zowel binnen als buiten de experimentele opstelling. Om deze reden kan worden gesteld dat het experiment minder geïsoleerd kan zijn van de buitenwereld dan het experiment naar entanglement met fotonen.

Een manier waarop fysisch kan worden gekeken naar hoeveel causale invloeden er zijn tussen het experiment en de buitenwereld, is door te kijken naar de mate van decoherentie. Het begrip decoherentie zoals het wordt gebruikt in de kwantummechanica, wordt in de Wikipedia Encyclopedie op de volgende manier beschreven:

"In quantum mechanics, quantum decoherence is the process by which quantum systems in complex environments exhibit classical behaviour. It occurs when a system interacts with its environment in such a way that different portions of its wavefunction can no longer interfere with each other. ... Decoherence occurs when a system loses phase coherence between different portions of its quantum mechanical state. It then no longer exhibits quantum interference between those portions (as might be seen in a double-slit experiment). Decoherence is caused by interactions with a second system which may be thought of as either "the environment" or as "a measuring device". ... As a result of an interaction, the wave functions of the system and the measuring device become entangled with each other. Decoherence happens when different portions of the system's

wavefunction become entangled in different ways with the measuring device. For two portions of the entangled system's state to interfere, the original system and the measuring device must both evolve into the same state. If the measuring device has many degrees of freedom, it is very unlikely for this to happen. As a consequence, the system behaves as a classical statistical ensemble of the different portions rather than as a single coherent quantum superposition of them." (Wikipedia, 2006j)

Decoherentie treedt dus op als een kwantsysteem interacties aangaat met een complexe omgeving. Hierdoor ontstaan er verschillende superposities en krijgt het systeem veel vrijheidsgraden. Hoe meer vrijheidsgraden het systeem heeft, hoe klassieker het zich zal gedragen.

Zoals ik hierboven heb uitgewerkt, lijkt het intuïtief waarschijnlijker dat we niet te maken hebben met een Bohrs experiment als er veel wisselwerking is tussen het apparaat en de buitenwereld. We kunnen dus concluderen dat de mate van decoherentie vanuit natuurkundig perspectief een indicatie is voor hoe waarschijnlijk het is dat we hier met een apparaat-wereldcomplex te maken hebben.

Een manier waarop het mogelijk is te testen in hoeverre er wisselwerking is tussen de buitenwereld en het experiment is de volgende. Als het experiment eerst met korte leads wordt uitgevoerd en daarna met lange leads, kan worden gekeken hoe groot de invloed van de omgeving op het experiment is. Deze test heeft vier verschillende hypothetische uitkomsten, die alle vier tot een verschillende conclusie zouden leiden over de vraag of we hier te maken hebben met een Bohrs experiment. Hieronder zal ik deze vier mogelijke uitkomsten en conclusies bespreken:

1. Uit het experiment met de korte leads kan worden geconcludeerd dat de elektronen entangled zijn; uit het experiment met de lange leads kan worden geconcludeerd dat de elektronen niet entangled zijn. Hieruit is te concluderen dat door een grote invloed van de omgeving decoherentie optreedt, zodat de elektronen in de langere leads niet meer entangled zijn. Gezien de grote invloed van de omgeving lijkt het onwaarschijnlijk dat we met een apparaat-wereldcomplex te maken hebben.
2. Uit het experiment met de korte leads kan worden geconcludeerd dat de elektronen niet entangled zijn; uit het experiment met de lange leads kan worden geconcludeerd dat de elektronen niet entangled zijn. Als het experiment deze resultaten oplevert is er niets te concluderen over de vraag of we wel of niet te maken hebben met een apparaat-wereldcomplex.
3. Uit het experiment met de korte leads kan worden geconcludeerd dat de elektronen entangled zijn; uit het experiment met de lange leads kan worden geconcludeerd dat de elektronen entangled zijn. Uit deze uitkomsten kunnen we concluderen dat de omgeving weinig invloed heeft op het experiment, waardoor er geen decoherentie optreedt. Het lijkt nu dus waarschijnlijk dat we met een apparaat-wereldcomplex te maken hebben.
4. Uit het experiment met de korte leads kan worden geconcludeerd dat de elektronen niet entangled zijn; uit het experiment met de lange leads kan

worden geconcludeerd dat de elektronen entangled zijn. Deze optie lijkt fysisch niet mogelijk.

Op deze manier lijkt het dus vanuit natuurkundig perspectief mogelijk om experimenteel vast te stellen of het waarschijnlijk is dat we in dit experiment te maken hebben met een Bohrs experiment of niet.

Filosofische reflectie

Hierboven heb ik een manier uitgewerkt om vanuit natuurkundig perspectief te testen of we te maken hebben met een Bohrs experiment. Als we hier uit wetenschapsfilosofisch oogpunt naar kijken, valt iets op in de redenering: er wordt geredeneerd op basis van entiteiten met capaciteiten en niet op basis van algemene wetten. Hieronder zal ik deze stelling uitwerken. Ik zal beginnen met het bespreken met een bekend voorbeeld uit de wetenschapsfilosofie, dat van de kraamvrouwenkoorts. Uit dit voorbeeld blijkt duidelijk hoe beide verschillende manieren van redeneren kunnen leiden tot verschillende manieren van onderzoek doen. Hierna zal ik een analogie trekken van dit voorbeeld naar het natuurkundige experiment uit hoofdstuk 3 en de natuurkundige ideeën over of we hier te maken hebben met een Bohrs apparaat, zoals ik in de vorige paragraaf heb besproken.

Halverwege de 19^e eeuw heeft Ignaz Semmelweis, een Oostenrijks-Hongaarse arts, onderzoek gedaan naar het optreden van kraamvrouwenkoorts (Wikipedia, 2006e,f; Boon, 2006a). Semmelweis werkte in een nieuw academisch ziekenhuis dat twee kraamafdelingen had. Op de ene kraamafdeling was het percentage vrouwen dat aan kraamvrouwenkoorts stierf veel hoger dan op de andere afdeling. Een van de weinige verschillen tussen beide afdelingen was dat op de eerste medisch studenten werden opgeleid en op de tweede vroedvrouwen.

Zoals ik in hoofdstuk 1 heb beschreven, zijn er twee soorten wetenschappelijke verklaringen van een fenomeen. Een eerste soort verklaringen is gebaseerd op causaliteit; een tweede soort wordt verklaringen wordt gegeven in termen van algemene wetten. Deze twee soorten verklaringen kunnen worden gebruikt in wetenschappelijk onderzoek.

Het is mogelijk een verklaring te geven in termen van algemene wetten van het fenomeen dat op de afdeling met de medisch studenten een hoger percentage vrouwen sterft aan kraamvrouwenkoorts dan op de andere afdeling. In deze verklaring wordt het fenomeen verklaard door middel van een algemene wet:

Algemene wet Op de afdeling waar medisch studenten worden opgeleid, sterven procentueel meer vrouwen aan kraamvrouwenkoorts dan op de afdeling waar vroedvrouwen worden opgeleid.

Als we stellen dat deze algemene wet de verklaring is voor het fenomeen, benaderen we de situatie als het ware als een Bohrs apparaat. We zien de situatie als een soort black-box, waarbij het niet mogelijk is kennis op te doen over dingen die in het apparaat gebeuren.

Het doel van het onderzoek van Semmelweis was het vinden van mogelijkheden om de sterfte aan kraamvrouwenkoorts op de afdeling van de medisch studenten te verkleinen. Als we kijken naar de verklaring van dit fenomeen in termen van algemene wetten, kunnen we weinig tot geen aanknopingspunten

vinden hoe dit doel kan worden bereikt. De enige oplossing lijkt te zijn om geen vrouwen meer op te nemen op de afdeling waar de medische studenten werken.

Semmelweis heeft in zijn onderzoek het probleem van de hoge sterfte aan kraamvrouwenkoorts op de afdeling van de medisch studenten op een andere manier proberen op te lossen. Hij heeft verschillende hypothesen opgesteld om te verklaren waarom er meer vrouwen sterven op ene afdeling dan op de andere. Vervolgens heeft hij geprobeerd deze hypothesen stuk voor stuk te testen, ofwel door redematies, ofwel door interventies.

De hypothese die Semmelweis uiteindelijk leidde tot een oplossing van het probleem van de hoge sterfte aan kraamvrouwenkoorts op de afdeling van de medisch studenten was de volgende:

Hypothese 1 Er is een verband tussen de anatomiecolleges die de medisch studenten volgen, welke altijd voorafgaan aan hun bezoek in de kraamzaal.

Vervolgens stelde Semmelweis een verdere hypothese op die dit verband duidelijker maakte en hem bovendien in staat stelde te proberen de situatie op te lossen.

Hypothese 2 Er is 'iets' dat de studenten overbrengen van de lijken naar de kraamafdeling, waardoor de vrouwen op deze afdeling ziek worden.

In deze hypothese postuleert Semmelweis dus het bestaan van een entiteit met de volgende capaciteiten:

- ze kan vrouwen ziek maken
- ze is te vinden op lijken
- ze kan door direct contact meegenomen en verplaatst worden

Om een oplossing voor het probleem te vinden, moest Semmelweis nog een capaciteit van deze entiteit postuleren:

- door desinfectie kan ze 'gedood' worden, zodat ze de vrouwen niet meer ziek kan maken

Als we kijken naar de manier waarop Semmelweis zijn onderzoek uitgevoerd heeft, kunnen we concluderen dat hij niet in termen van algemene wetten heeft geredeneerd, maar gebruik heeft gemaakt van causale verklaringen van het fenomeen. Hierbij heeft hij geredeneerd op basis van ideeën over entiteiten met capaciteiten. Alleen deze manier van redeneren kon hem in staat stellen het probleem op te lossen.

Als we naar bovenstaand voorbeeld kijken, zijn er dus duidelijk twee verschillende manieren waarop er in de wetenschap kan worden geredeneerd. Ten eerste kan er worden geredeneerd in termen van algemene wetten; ten tweede kan er worden geredeneerd op basis van causaliteit.

In ons dagelijks leven maken we veel gebruik van redeneringen op basis van causaliteit. Een wetenschapsfilosofische stroming die in de 20^e eeuw veel invloed heeft gehad, het logisch positivisme, heeft echter gesteld dat men in de natuurwetenschap gebruik moet maken van verklaringen in termen van algemene wetten. Het logisch positivisme is sterk beïnvloed door de visie van David Hume, die

de notie van causaliteit heeft onderzocht. Hume gaat ervan uit dat we al onze kennis opdoen uit ervaring. Hij concludeert dat we nergens in deze ervaring een noodzakelijke verbinding tussen twee gebeurtenissen kunnen waarnemen. Het enige dat we volgens hem kunnen waarnemen is een continue verbondenheid van deze twee gebeurtenissen. Om deze reden is de notie van causaliteit volgens de visie van David Hume een metafysische notie. Het logisch positivisme stelt dat, omdat de notie van causaliteit volgens Hume een metafysische notie is, causaliteit in natuurwetenschappelijke verklaringen vermeden moet worden. Volgens het logisch positivisme moeten we ons in natuurwetenschappelijke verklaringen dus beperken tot het beschrijven van correlaties, weergegeven in de vorm van algemene wetten.

In haar 'Laws in Scientific Practise: Against Humean Empiricism' (Boon, 2006c), schrijft Mieke Boon een kritiek op de visie dat de notie van causaliteit gezien moet worden als een metafysische notie en daarom moet worden vermeden in natuurwetenschappelijke verklaringen. Hierin stelt ze dat binnen Humes denkkader causaliteit inderdaad moet worden gezien als een metafysische notie. Haar kritiek is dan ook niet gericht op Humes redenatie, maar op het model van wetenschap dat hij hierbij hanteert. Hume stelt dat we al onze kennis opdoen uit ervaring. Zoals Boon uitwerkt, betekent ervaring voor Hume observatie. Kennis wordt hierbij dus opgedaan door een soort passieve registratie van de gebeurtenissen om ons heen. Boon geeft aan dat dit voor te stellen is alsof we gebeurtenissen op een scherm observeren. Om deze reden noemt ze Humes model een 'screen model' van de natuurwetenschappen. Binnen dit 'screen model' is er volgens haar inderdaad alleen waar te nemen dat twee gebeurtenissen op elkaar volgen en kunnen we nooit een causale relatie waarnemen:

"Therefore, in an account of scientific reasoning where it is assumed that observation is our only source of knowledge, there is no proper reason for making a distinction between constant conjunction - that is *regularities* - and causal or necessary relations between events - that is *laws*. In other words, there is no epistemological difference in the meaning of an accidentally true universal generalization and a law; the difference lies on the metaphysical level. Merely metaphysical questions of how the observed patterns were brought about might lead to the concept of causal (or necessary) relations between events. Therefore, within the screen-model of scientific reasoning, reference to causal or necessary relations between events is unavoidably metaphysical." (Boon, 2006c, p. 14)

Volgens Boon geeft dit 'screen model' van de wetenschap echter niet weer hoe men in de natuurwetenschappen echt werkt. In de natuurwetenschappen is er juist een belangrijke rol weggelegd voor experimenten. Hierbij kunnen we de wetenschappers dus niet zien als passieve observatoren, maar spelen ze juist een actieve rol. Dit noemt Boon een 'laboratory model' van de natuurwetenschappen.

Volgens dit 'laboratory model' speelt actief ingrijpen een belangrijke rol. Hierbij worden fenomenen gecreëerd, worden ze gemanipuleerd en gaat men interacties aan met deze fenomenen. Door dit actieve ingrijpen kunnen we waarnemen of onze acties gevolgen hebben voor de uitkomsten van het experiment. Volgens Boon levert dit ons kennis op over causale relaties. Zij stelt dat we ons idee van causale relaties dus niet verkrijgen uit observaties van een constante

verbondenheid van twee gebeurtenissen, maar uit het actieve ingrijpen in de wereld om ons heen:

“Often, we only need one or two events for deciding about causal relations. When I throw a stone and the window breaks, I am quite sure that my throwing of the stone caused the breaking of the window. When I manipulate the needle of the barometer in order to find out whether this meter causes changes in the whether, I only need to do this a few times in coming to my conclusion that it does not. What I can already conclude from these examples is that *constant conjunction* is not a proper epistemological *criterion* for the determination of a causal connection. Instead, the criterion that we use for distinguishing between causal and non-causal relations between events is by judging the consequences of an intervention on an event that might be causal. Our criterion for making a causal judgment is *whether our interactions do have an effect*.” (Boon, 2006c, pp. 18-19)

Het verklaren in termen van algemene wetten waarbij causaliteit vermeden wordt, is dus direct verbonden met het idee van het ‘screen model’ van de natuurwetenschappen. Als men werkt binnen een ‘laboratory model’ van de natuurwetenschappen, wordt er geredeneerd in termen van entiteiten met capaciteiten. Men gaat er hierbij van uit dat direct ingrijpen ons kennis kan opleveren over causale relaties.

Ook in het natuurwetenschappelijke experiment naar entanglement kan zowel in termen van algemene wetten als op basis van causaliteit worden geredeneerd. Als er hierbij wordt geredeneerd in termen van algemene wetten, kan het experiment gezien worden als een Bohrs experiment. Er kan nu namelijk geen kennis worden opgedaan over hoe het apparaat werkt, zodat we dit alleen kunnen zien als een black-box. Hierbij wordt het apparaat als het ware dus zelf als entiteit met eigenschappen/capaciteiten gezien.

In dit geval kunnen we vanuit het ‘screen model’ de experimentator zien als een passieve observator. Hij ziet in dit onderzoek de experimentele opstelling en zijn experimentele resultaten als het ware op een scherm geprojecteerd. Het experimentele resultaat geeft in het geval van hoofdstuk 3 weer of we positieve of negatieve correlaties waarnemen. De enige conclusie die nu uit deze gegevens kan worden getrokken is:

Conclusie 1 Het apparaat dat ik op het scherm zie, geeft als output een positieve/negatieve correlatie.

Op het moment dat we een kleine wijziging in het apparaat zouden aanbrengen, of een ander apparaat zouden gebruiken, zou het alleen mogelijk zijn om de volgende conclusie te trekken:

Conclusie 2 Het gewijzigde/andere apparaat dat ik op het scherm zie, geeft als output een positieve/negatieve correlatie.

Als we op deze manier zouden redeneren, lijkt het niet mogelijk experimenteel onderzoek te doen. Ten eerste lijkt het onmogelijk te bedenken hoe en waarom we een bepaalde experimentele opstelling bouwen. Ten tweede lijkt het

onmogelijk om te bedenken hoe en waarom we bepaalde aanpassingen in deze experimentele opstelling willen doorvoeren. Het 'screen model' lijkt dus geen goede beschrijving te zijn van hoe men in de natuurwetenschappen werkt.

Om experimenteel onderzoek te doen, lijkt het dus noodzakelijk gebruik te maken van causale verklaringen in plaats van verklaringen op basis van algemene wetten. Hiervoor is er kennis nodig over hoe en wat we bij dit experiment precies onderzoeken. Hierbij wordt er gedacht in termen van entiteiten met capaciteiten waarmee we kunnen interveniëren. Het 'laboratory model' van de natuurwetenschappen lijkt hier dus goed bij te passen.

Als we kijken naar de fysische redenatie uit de vorige paragraaf betreffende de vraag of we te maken hebben met een Bohrs apparaat, valt het op dat er wordt gedacht in termen van entiteiten met capaciteiten. Er wordt gesproken in termen van elektronen die interacties aan kunnen gaan met de buitenwereld. De reden dat ze dit kunnen is dat ze de eigenschappen lading en massa hebben. Daarom hebben ze de capaciteit dat ze interacties aan kunnen gaan door zwaartekracht of Coulombkracht.

Behalve dat er wordt gedacht in termen van entiteiten met capaciteiten, wordt er ook gedacht in termen van interveniëren in het experiment. Zo wordt er gesproken over het variëren van de lengte van de leads, om de mate van decoherentie te variëren. Hieronder zal ik de rol van het interveniëren verder uitwerken. Eerst zal ik deze rol van interventies illustreren op basis van het onderzoek naar decoherentie. Daarna zal ik dit betrekken op de fysische redenatie uit de vorige paragraaf.

Als we een meting op een kwantumsysteem uitvoeren, vindt er een zogenaamde 'collapse of the wave function' plaats (zie ook hoofdstuk 3). Tot voor kort was dit fenomeen nog niet te verklaren in termen van causaliteit (er zijn wel een aantal mogelijke verklaringen opgesteld, maar deze zijn nooit algemeen geaccepteerd geworden). Er was wel een verklaring in termen van een algemene wet: als er een meting wordt uitgevoerd op een kwantumsysteem, vindt er een 'collapse of the wave function' plaats. Deze verklaring was niet bevredigend voor filosofisch geïnteresseerde natuurkundigen, waardoor men altijd op zoek is geweest naar interpretaties waarom deze 'collapse' optreedt. Recentelijk is een nieuwe fysische theorie opgesteld die stelt dat de collapse te maken heeft met decoherentie (zie ook pagina 105). Hierbij wordt er een causale verklaring van deze collapse gegeven: door interacties van het kwantumsysteem met de buitenwereld neemt zijn aantal vrijheidsgraden toe, waardoor ze zich klassieker gaat gedragen.

Men is op dit moment bezig met experimenteel onderzoek naar deze decoherentie. Dit onderzoek is erg succesvol en men heeft experimenteel al verschillende mates van decoherentie kunnen realiseren. Verder is het experimenteel gelukt om het proces van decoherentie om te keren. Door deze experimentele successen, waarbij het mogelijk is de mate van decoherentie te beïnvloeden, lijkt het steeds aannemelijker dat de 'collapse of the wave function' inderdaad veroorzaakt wordt door decoherentie van het kwantumsysteem. Door interventie in de mate van decoherentie kan het experiment ons nu dus informatie opleveren over de causale relaties die ten grondslag liggen aan de 'collapse of the wave function'.

In paragraaf 6.4.3 heb ik beschreven dat het volgens fysici alleen bij optie 1 op pagina 105 (als bij lange leads geen entanglement wordt gemeten en bij korte leads wel) waarschijnlijk is dat we niet te maken hebben met een Bohrs experiment. Dit lijkt te maken te hebben met het feit dat in het in dit geval experimenteel mogelijk blijkt door interventie de mate van decoherentie te kunnen beïnvloeden.

Hoewel de invloed van de omgeving op de elektronenparen niet experimenteel beïnvloed kan worden, kan wel de mate van invloed gecontroleerd worden door de lengte van de leads te variëren. Op deze manier kan dus de mate van decoherentie worden beïnvloed. Fysische intuïties vertellen ons dat als bij korte leads entanglement wordt waargenomen en bij lange leads niet - dus dat door het verlengen of verkorten van de leads controle kan worden uitgeoefend over of het systeem zich kwantummechanisch of door decoherentie klassiek gedraagt - we kunnen concluderen dat we niet te maken hebben met een Bohrs experiment. Als het verlengen van de leads niets uitmaakt voor de mate van decoherentie, lijken onze interventies geen invloed te hebben op de experimentele uitkomst. Hierdoor is het volgens fysische intuïties in dit geval waarschijnlijker dat we te maken hebben met een Bohrs apparaat.

Het interveniëren in de mate van decoherentie stelt ons dus in staat om causale verbanden op te stellen en op deze manier het fenomeen te begrijpen en te verklaren. Door interventie kan er dus op deze manier kennis worden verkregen over het fenomeen entanglement.

Het 'laboratory model' dat opgesteld is door Mieke Boon lijkt dus beter overeen te komen met de experimentele praktijk dan het 'screen model' van David Hume. Er is nu te concluderen dat we door onze interacties in experimenten kennis kunnen krijgen over causale invloeden. Op deze manier is het mogelijk kennis te krijgen over wat er in het apparaat gebeurt en hebben we dus niet te maken met een Bohrs apparaat.

6.5 Vruchtbare experimenten?

Hierboven hebben we gekeken naar de vraag of het natuurkundige experiment uit hoofdstuk 3 kan worden getypeerd als een Bohrs experiment. Een belangrijke vraag hierbij was hoe groot de rol is die causaliteit in het experiment speelt. Zoals Rom Harré in zijn artikel 'The Materiality of Instruments in a Metaphysics for Experiments' (Harré, 2003) heeft beschreven, kunnen we een Bohrs apparaat zien als een black-box waaruit we alleen kennis over correlaties en niet over causaliteiten kunnen krijgen. Causaliteit speelt in experimenten die gebruik maken van dit soort apparaten dus een minimale rol. Zoals ik hierboven heb uitgewerkt speelt in het experiment van hoofdstuk 3 causaliteit op bepaalde punten wél een belangrijke rol. Er wordt bijvoorbeeld gebruik gemaakt van een mechanistisch model van twee entanglede elektronen.

We kunnen ons afvragen of het überhaupt mogelijk is alleen in niet-causale termen te denken bij het opzetten van een experiment. Met deze vraag zal ik me deze paragraaf bezighouden.

Zoals uitgewerkt in paragraaf 6.2.2, kunnen we het idee van een Bohrs experiment in drie verschillende vragen onderverdelen. Ten eerste is dit de vraag

behandeld door Harré of de theoretische entiteit alleen in het apparaat-wereld-complex of ook in de wereld zelf bestaat. Ten tweede is dit de vraag waar Niels Bohr zich mee bezig heeft gehouden, of het mogelijk is een ontologisch onderscheid te maken tussen het apparaat en de entiteit die wordt onderzocht. Ten derde is dit de methodologische vraag van Hans Radder of er een methode is waarop Bohrse experimenten wel kennis over de wereld kunnen opleveren.

Als we naar deze drie noties van een Bohrs apparaat kijken, kunnen we concluderen dat Hans Radder de enige van deze drie onderzoekers is die constructief naar het idee van Bohrse experimenten in de natuurwetenschappen kijkt. Hij zoekt hierbij namelijk naar een manier waarop Bohrse experimenten wél kennis over de wereld kunnen opleveren.

Verder kunnen we ons op basis van de notie van Niels Bohr afvragen of het mogelijk is vruchtbare natuurwetenschappelijke experimenten op te zetten vanuit het idee dat er geen ontologisch onderscheid te maken is tussen het apparaat en het te onderzoeken object. Een basisidee van natuurwetenschappelijke experimenten lijkt namelijk te zijn dat er 'iets' wordt gemanipuleerd en dat de resultaten hiervan worden bestudeerd. Als we het experiment zien als een black-box, zoals Niels Bohr dit doet, waarbij er geen ontologisch onderscheid te maken is tussen het te onderzoeken object en het apparaat, lijkt het lastig om nog vast te houden aan dit idee van het manipuleren van een object. We kunnen ons nu afvragen of het mogelijk is om vanuit dit idee dat er geen ontologisch onderscheid te maken is tussen te onderzoeken object en apparaat vruchtbare experimenten op te zetten.

Om bovenstaande vraag te beantwoorden, is het volgens mij belangrijk een onderscheid te maken tussen experimenten die nog nooit eerder zijn gedaan en al bestaande experimenten. In het tweede geval is het mijns inziens mogelijk een experiment uit te voeren zonder enig begrip van wat er precies in het experiment gebeurt. Het kan nu dus worden benaderd als een black-box. Deze manier van experimenteren is volgens mij te vergelijken met het eerste niveau van experimentele wetenschap dat onderscheiden wordt door Rainer Lange (Lange, 2003). Volgens Lange is het mogelijk recepten voor het uitvoeren van deze experimenten op te stellen die de onderzoeker opvolgt. De onderzoeker hoeft nu dus geen begrip te hebben van wat hij manipuleert in het experiment.

Bij het opzetten van een nieuw experiment is het mijns inziens níet mogelijk het experiment te benaderen als een black-box. Er moeten keuzes worden gemaakt over wat er wordt getest, hoe het wordt getest en hoe het apparaat gebouwd moet worden. Om deze vragen te kunnen beantwoorden, is een zeker causaal begrip nodig van wat er in het apparaat gebeurt. Om deze reden moet er zeker een ontologisch onderscheid tussen de opstelling en het te testen object worden voorondersteld.

Uit bovenstaande lijkt het dus in ieder geval bij het opzetten van een experiment noodzakelijk bepaalde mechanistische kennis te hebben over wat er in het experiment gebeurt. Deze mechanistische kennis kan bijdragen aan de ontwikkeling van vruchtbare experimenten. Als we kijken naar het experiment uit hoofdstuk 3, kunnen we stellen dat deze mechanistische kennis nauw samenhangt met de interpretatie van de kwantummechanica. Een interpretatie levert ons namelijk meer causaal begrip op van het gedrag van de entiteiten in het experiment.

Een mogelijke gevolgtrekking hieruit is dat een goede interpretatie van de kwantummechanica zou kunnen leiden tot de ontwikkeling van meer vruchtbare kwantummechanische experimenten. Dit zou een extra stimulans kunnen geven om te zoeken naar een goede interpretatie van de kwantummechanica. Of een goede interpretatie inderdaad tot vruchtbare experimenten kan leiden, is een interessante vraag waar eventueel vervolgonderzoek zich op zou kunnen richten.

6.6 Conclusie

In dit hoofdstuk heb ik drie methodes uitgewerkt waarmee kan worden getest of we te maken hebben met een Bohrs experiment. Volgens deze drie methodes heb ik getest of het experiment uit hoofdstuk 3 kan worden gezien als een Bohrs experiment.

Op basis van de paragrafen 6.4.1, 6.4.2 en 6.4.3 kunnen we concluderen dat het waarschijnlijk is dat we in dit geval niet te maken hebben met een Bohrs experiment. Hiervoor zijn verschillende redenen aan te voeren. Ten eerste speelt niet alleen een nomo-mathematisch model een rol in het opzetten van het experiment, maar is er ook een belangrijke rol weggelegd voor mechanistische, diagrammatische en experimentele modellen (zie paragraaf 6.4.1). Ten tweede treedt er geen circulariteit op omdat een experimenteel model getest wordt, terwijl het nomo-mathematische model van de kwantummechanica wordt gebruikt om de experimentele resultaten te interpreteren (zie paragraaf 6.4.2). Ten derde wordt er gedacht in termen van capaciteiten met entiteiten en het interveniëren en manipuleren hiervan. Door deze interventies lijkt het mogelijk om kennis op te doen over causale relaties. Deze kennis is niet alleen geldig binnen het apparaat-wereldcomplex, zoals besproken in paragraaf 6.4.3.

Part III

Summary and Conclusions

Chapter 7

Summary and Conclusions

7.1 Background to my thesis

Philosophical problems of causation, of explanations in science, and the special complications quantum mechanics introduces for these have been widely discussed in philosophy of science. Most traditional philosophical debates abstract from scientific practice, in particular from how instruments and experiments are designed and used, and from how experimental results are interpreted. As my interest is in scientific reasoning within scientific practice, I have not addressed the main traditional debates. My main interest has been whether causal reasoning is eliminable in the design and interpretation of quantum mechanical experiments. In my philosophical analysis I have used my own research in quantum physics as a case study.

When studying the physics literature on quantum mechanics, it can be concluded that causal reasoning plays an important role in experimental approaches to quantum mechanics. Performing quantum mechanical experiments, we at least have to understand what happens in the experiment to be able to design the instrument and the experiment, and to interpret its experimental results. Understanding usually implies causal characterizations of the instrument and of the experiments performed with it. In theoretical approaches to quantum mechanics on the other hand, causal reasoning seems to be mostly abandoned. A reason for this can be found in the fact that causation is a problematic notion in quantum mechanics as well as in philosophy of science.

In quantum mechanics, causation is a problematic notion because Hume's criteria for causation don't always seem to be fulfilled. David Hume provided these criteria in an influential explication of the concept. According to Hume, a causal relation is a relation of regularity between two phenomena: a cause and an effect. There has to be a constant conjunction between the cause and the effect and the cause *always* has to precede the effect. Furthermore, there has to be proximity in space and time between the cause and the effect. In modern science, the requirement of proximity in space and time is made more precise by the physical requirement of locality. Albert Einstein demonstrated that particles cannot travel with a velocity greater than that of light, which is a finite quantity. Since information has to be transmitted by some kind of mediator, which thus travels with a finite velocity smaller than or equal to that

of light, it takes some time to transfer information from one place to another. Therefore, a cause cannot *instantaneously* bring about an effect at some spatial distance. In the microworld, this requirement of locality seems to be violated.

An example in which quantum mechanics doesn't seem to fulfil all of the above-stated requirements for causation can be found in the phenomenon of entanglement. Below, I illustrate this phenomenon by discussing spin entanglement of electrons. I studied this phenomenon in my bachelors research and have also used it as a case study in this thesis.

Upon measurement, an electron can give two values for its spin, associated with two eigenstates: spin up or spin down. Creating two electrons which must have opposite spin, there are two possibilities: the first has spin up and the second spin down or the first has spin down and the second spin up. These are the two eigenstates of the compound system. Quantum mechanics mathematically predicts that the two electrons, if not forced to be in a particular eigenstate, will be joined in a state of superposition of the two possible eigenstates. Hence, their state is mathematically described by a single wave equation which describes their joint motion:

$$|e^-, e^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_{e^-} \downarrow_{e^-}\rangle \pm |\downarrow_{e^-} \uparrow_{e^-}\rangle) \quad (7.1)$$

Measuring the state of the particle, we never measure a superposition, i.e. we never get an undefined value for a variable. However, if a spin measurement on the first particle would give the value spin up, a subsequent measurement on the second particle will always give spin down as long as there have been no further interactions, and vice versa. This phenomenon is called entanglement. But when the two electrons are spatially separated, how can the second particle "know" that the first has been measured and has given the result spin up? If the measurements are performed immediately after each other, it is not possible for information to have been exchanged between the two electrons: this information would have to travel with an infinite velocity. Hence, the phenomenon of entanglement seems to violate Einstein's requirement of locality.

Apart from this problem with causation encountered in physics, there is also a philosophical problem with causation which has been raised by Hume. Hume defended a strict empiricism, and therefore presupposed that all our knowledge has to be acquired through experience. Based on this presupposition, Hume concludes that all our *ideas* have to be based on *impressions*. Ideas can be seen as knowledge of the world; impressions are observations of the world.

However, according to Hume, not all knowledge can be directly observed through the senses. In particular, the relations between things cannot be observed. We can see that B happens after A, but we cannot see that A "causes" B, i.e. that there is a necessary connection between A and B. Therefore, Hume concludes that we can also combine ideas in our imagination to form new ideas. This combination can be logically entailed by the relationships between ideas. However, if this is not the case, like with causation, these new ideas can only be a construct of our imagination. From this, Hume concluded that causation has to be considered to be a metaphysical notion, that is, something that we presuppose about the world, but cannot possibly observe.

Thus, there seems to be a tension between the idea that we need some kind of causal understanding to design and interpret an experiment on the one hand

and the philosophical and physical problems concerned with it on the other. Therefore, we can ask ourselves if the reasoning in the design and interpretation of quantum mechanical experiments can be reconstructed into a form in which causal reasoning is eliminated. In my research I have analysed this question.

In approaching this question, I have analysed a case from scientific practice. This case results from my bachelors research in applied physics. In order to analyse this case, in the first chapters of my thesis I constructed a philosophical framework which is based on the philosophical literature on causation, on explanations in science, and on the different kinds of knowledge used in the design and interpretation of experiments.

7.2 Philosophical framework

In this section I will discuss the philosophical framework I have used to analyse my case. I will first discuss accounts of the idea that causal connections can be eliminated from scientific theories. An important approach in this regard is the Received View, which argues that scientific theories can be reconstructed in such a way that they don't have to rely on primitive causal notions. Thereafter, I will discuss the positions of Hacking and Cartwright, who have argued that experiments can be considered to be interventions. Furthermore, I will discuss the distinction between theory and models and address the philosophical problem of causation in terms of two epistemological models of science.

7.2.1 Eliminating causal connections from science

A philosophical position which claims that scientific theories *can* be reconstructed in such a way that primitive causal connections are eliminated is the Received View. The Received View has been the dominant position in philosophy of science during most of the 20th century and has been strongly influenced by the philosophy of David Hume. As Hume concluded, causation has to be considered to be a metaphysical notion. Since science aims at objective knowledge, it should avoid metaphysics. Therefore, making use of primitive causal notions in science is philosophically problematic. This is the reason why the Received View has focused on reconstructing scientific theories in such a way that it doesn't have to rely on primitive causal notions. To achieve this goal, the Received View ascribes an important role to logical reasoning and focuses on the axiomatization of theories.

Analysing science, it can be concluded that it is not possible to directly link theoretical laws to observations; there is something needed to bridge this gap. Philosophers of the Received View have argued that this is done by so-called correspondence rules. These correspondence rules link theoretical terms to observational terms. Together with theoretical laws, they are considered to be part of the *theory*.

A philosopher of the Received View who studied the scientific method of testing hypotheses is Carl Gustav Hempel. Hempel argued that the reconstruction of the scientific testing of hypotheses can be understood in terms of the Hypothetico-Deductive (HD) method. The HD-method assumes that in science we can deductively obtain experimental consequences from hypotheses. If observations correspond to the experimental predictions, they increase the extent

to which the theory is confirmed.

Theoretical entities

In modern science, many experiments deal with theoretical entities. Since it is not possible to directly observe these theoretical entities, the Received View argues that correspondence rules are needed to provide them with empirical meaning. This way, the theoretical entities can be seen as purely instrumental and metaphysics can be avoided. The correspondence rules need to refer to observations from instruments. Because of this, in the Received View the theoretical entities become intertwined with the instruments such that the only way to meaningfully talk about a theoretical entity is to refer to observations made using instruments.

This idea can also be seen in the position of Niels Bohr. Bohr's view is based on physical considerations.¹ In spite of the fact that their accounts are based on different considerations, the Received View and Bohr agree that in experiments with theoretical entities it is not possible to clearly distinguish between the theoretical entity and the instrument. Bohr argued that in classical physics, physicists assume that an object in the physical world has properties in-itself, i.e. as inherent properties, independent of their actual observation (Faye, 2002). In performing experiments in modern physics, however, according to Bohr, it is not possible to make a clear distinction between entity and instrument: entity and instrument can no longer be ontologically separated.

Philosophers in the Received View who focus on phenomenalism, i.e. those who think in terms of sense data, correspondence rules and theoretical terms, cannot talk about theoretical entities without reference to sense data, which have to be obtained from experiments and instruments. Therefore, an inevitable result of this idea is the conclusion that it is not possible to obtain knowledge about entities from experiments without reference to an instrument type.

This idea can also be found in the position of Rom Harré. Although Harré belongs to a different philosophical tradition, he agrees with the Received View on this issue. The reason for this can be found in the presuppositions used by Harré and the Received View. Both consider experiments to be passive observations of the world rather than active interventions with it. More on this issue can be found in section 7.2.4. Since it is not possible to directly observe theoretical entities, we can only refer to the entity in combination with an instrument.

In accord with Bohr's account, Harré concluded that it is no longer possible to ontologically separate instrument and entity in modern scientific experiments in which theoretical entities are postulated. Harré has called these experiments Bohrian experiments. An example of a Bohrian experiment given by Harré is that of experiments using the particle accelerator in CERN, Genève, in which it is not possible to ontologically separate the accelerator and the detected particles. An example of a scientific experiment which is not a Bohrian experiment according to Harré is an experiment studying the behaviour of *Drosophila*. In this experiment, the *Drosophila* are placed in a laboratory in which the outside world is modelled. Harré has argued that in this example we are not dealing

¹To explain these considerations would require too elaborate of a discussion. More on this issue can be found in Bohr's phenomenological response to the EPR-paper in 1935 (Bohr, 1935).

with a Bohrian experiment because the *Drosophilae* are not theoretical entities: we can simply observe them and place them in a different environment. Because in Bohrian experiments it is no longer possible to ontologically separate instrument and entity, it is not possible to obtain knowledge about the theoretical entity from experiments; it is only possible to obtain knowledge about the entity in combination with an instrument. Harré has called this combination an apparatus-world complex and has concluded that knowledge obtained from Bohrian experiments can only give us knowledge of a particular apparatus-world complex.

7.2.2 Experiments as interventions

Opposed to accounts in which causal connections are considered to be eliminable are accounts which ascribe an important, ineliminable role to causal reasoning in science. These positions take a new approach towards scientific experiments and can be found in more contemporary philosophy of science.

An important philosopher in this tradition is Ian Hacking. According to Hacking, scientific experiments can be seen as interventions with the world. He argues that being able to manipulate a theoretical entity indicates that the entity exists. For example, he discusses how it is possible to alter the charge on a niobium ball using electrons or positrons. To accomplish this, physicists spray the ball with positrons to increase the charge or with electrons to decrease the charge. Based on this example, Hacking comes to his famous conclusion: "So far as I'm concerned, if you can spray them then they are real" (Hacking, 1983, p. 23). Contrasting this position to Harré's, for Hacking, interventions make it possible to ontologically separate the instrument and the entity because being able to manipulate the entity implies that it is distinct from the complex. Because of this ontological separation, knowledge from these experiments is no longer restricted to an apparatus-world complex and it is possible to conclude that the theoretical entity is real.

Another philosopher in this tradition is Nancy Cartwright. According to Cartwright, in experiments, a specific environment is created in which the entity exerts certain capacities. Cartwright defines capacities as "abilities, tendencies and propensities to do" (Cartwright, 1999, p. 64). Thus, capacities can be seen as the properties that the entity would exhibit, were it in the appropriate situation. Cartwright argues that it is possible to obtain knowledge on an entities' capacities from interventions. Thus, by experimenting, we can obtain knowledge on the causal behaviour of the entities.

7.2.3 Theory and models

In the Received View, it is assumed that it is possible to link theory and experiment by correspondence rules. However, Morrison and Morgan (Morrison & Morgan, 1999) have argued that it is not possible to directly link theory and observation. According to their view, models play a mediating role in this.

Cartwright agrees with Morrison and Morgan that we need models to mediate between theory and experiment. According to Cartwright, science has two main goals: First, it tries to find causal explanations of phenomena. Second, it tries to find mathematical explanations which describe the behaviour of these

phenomena. In clarifying this view, Cartwright introduces two kinds of models. The first kind of model presents a causal story. The second kind of model fits the phenomenon into a theoretical framework. In the first kind of model, entities with capacities play an important role: they present the causal story. Cartwright's hypothesis is that even in constructing mathematical explanations, knowledge of capacities plays an important role. Cartwright doesn't agree with the Received View that reference to causal connections can be eliminated by reconstructing science. According to her, even in constructing mathematical models, we need to use non-deductive reasoning. She argues that in order to make these non-deductive steps we are forced to make use of knowledge of capacities. I will explain what steps have to be taken and why in section 7.3.4.

Mieke Boon has further developed this idea of Cartwright and has distinguished four different kinds of models:

Mechanistic models The goal of mechanistic models is to find the mechanism behind a phenomenon in order to give a causal explanation of why it occurs. In mechanistic models, use is made of reasoning in terms of entities with capacities. This way, it is possible to describe the causal behaviour of the entity. Hence, the mechanistic model can give causal explanations of why the phenomenon occurs. An example of a mechanistic model related to my case is that of the causal behaviour of entangled electrons.

Nomo-mathematical models Of the four types of models, nomo-mathematical models are those in which mathematics is the most important. In nomo-mathematical models, physical phenomena and processes are represented by a set of mathematical equations. The prefix "nomo-"² explicitly indicates that we are dealing with a *physically* interpreted set of equations, which is no longer abstract and separated from concrete physical systems. An example of a nomo-mathematical model related to my case is the mathematical derivation of entanglement from Schrödinger's equation.

Thus, mechanistic models give explanations in terms of causation, whereas nomo-mathematical models give explanations in terms of universal laws. Based on the view of Wesley Salmon (Salmon, 2002), Boon argues that both types of explanations are complementary and strongly related to each other.

Diagrammatic models Diagrammatic models get their name from the fact that they use a diagram or graphic scheme as a representative tool. In diagrammatic models, the spatial and temporal behaviour of the entity is modelled. With respect to experiments, the diagrammatic model thus models the behaviour of the entity in the instrument. An example of this from my case is the graphically modelled behaviour of a particle in a double potential well which can be found in figure 5.1. Another slightly more disguised example is the modelling of the behaviour of the entangled electrons inside the leads. The description of this behaviour gives a way of picturing it.

Experimental models In experimental models, the experimental set-up is modelled. First, the working of the instrument is modelled. An example of

²"Nomos" means "law of nature" in Greek.

this is the experimental set-up of the experiment testing Bell's inequalities discussed in chapter 3. Second, the interactions between the instrument and the entity are modelled. An example of this is the behaviour of entangled electrons at the interface of the superconductor and the normal metal leads. The goal of these experimental models is to clarify what is tested in the experiment and how this is done.

7.2.4 The philosophical problem of causation

According to approaches like Hacking's and Cartwright's, causal reasoning plays an important, ineliminable role in science. However, we are still left with the philosophical problem that causation has to be considered to be a metaphysical notion, which led the Received View to the idea that science has to be reconstructed in such a way that reference to causal connections is eliminated. This problem on the status of causal reasoning in science is analysed by Boon. According to her, Hume's problem of causation arises from his implicit presupposition of radical empiricism. This can be illustrated by characterizing two different kinds of models of our epistemological relation to the world: the screen model and the laboratory model of science (Boon, 2006c).

According to Boon, the reason that Hume concludes that causation is a metaphysical notion can be found in the model of science he presupposes. Hume assumes we obtain all our knowledge through experience. Experience according to Hume is observation, i.e. a purely passive registration of the world. Boon claims that this is like observing phenomena on a screen. Because of this, she characterizes the model of science Hume presupposes as a screen model of science. Boon argues that presupposing this screen model, we have to agree with Hume that we can only observe constant conjunction of two phenomena; we can never observe a causal relation.

However, according to Boon, it is also possible to presuppose another model of our epistemological relation to the world: the laboratory model of science. Presupposing this model, scientists are not considered to be passive observers of nature. Instead, scientists play an active role in creating and manipulating phenomena, and interacting with these phenomena. Due to this active participation, it is possible to observe the influence of our actions on the outcome of the experiment. Boon argues that if we presuppose a model of science in which we observe the influence of our actions, it is possible to get knowledge on causal relations. Thus, according to Boon, if we presuppose scientists to be passive observers of the world, it is indeed true that we can only observe constant conjunction of two phenomena. However, she argues that if we presuppose scientists to intervene with the world, it is possible to get knowledge about causal relations from these active interventions. Therefore, presupposing the laboratory model of science, the problem of causation is seen in a totally different light and it is not a problem anymore.

7.3 Analysis of the results of my thesis

7.3.1 Introduction

In chapters 5 and 6 I analysed the case study. In the following section, I will extend the analysis, using the concepts I described in section 7.2. First, I will briefly review the case. A more detailed discussion can be found in chapter 3.

In the case study, Bell's inequalities test whether entanglement is a property of electrons. In this, use is made of superconductors. In superconductors, two electrons can be bound together in a certain way, forming so-called Cooper pairs. These Cooper pairs can be Andreev reflected at the interface of the superconductor and a normal metal. In this normal metal, we now have bound pairs of electrons. The electrons in these pairs can be spatially separated using two normal-metal leads, making sure that each of the electrons in a pair goes into a different lead. By applying a voltage over the leads, the electrons can be made to move to the end of the leads. At the end of the leads, the spin of the electrons is measured. If the electrons had been entangled, we would expect the detectors at the end of the leads to detect the electrons at the same time and with opposite spin, i.e. performing cross-correlation measurements, we would expect positive correlations if the electrons had been entangled.

The environment is expected to have a big influence on the state of the electrons. A physical theory describing this influence is decoherence. This theory roughly states that the more interactions a system has, the more classically it will behave (Wikipedia, 2006j). Thus, a particle might exhibit entangled behaviour, but when it has too many interactions, it will start behaving classically and cease to be entangled. The number of interactions can be influenced by using shorter or longer leads: reaching the end of a longer lead, a particle will have had many more interactions with the environment than one at the end of a shorter lead.

Thus, in this experiment, it is tested whether entanglement is a property of electrons. If this is the case, positive correlations will be measured at the end of the leads. In describing this experiment, physicists speak in terms of an entity, the electron, with properties, i.e. physicists seem to reason in terms of causal relations and ontologically distinct entities and instruments.

According to the Received View, scientific reasoning can be reconstructed in such a way that reference to primitive causal notions is eliminated, i.e. that reference to interactions, interventions and capacities is eliminated. Bohr and Harré agree with the Received View that all causal reasoning in scientific practice is merely heuristic. According to them, in modern scientific experiments it is not possible to ontologically separate the instrument and the theoretical entity. Harré called these experiments Bohrian experiments. Because we cannot ontologically separate instrument and entity in Bohrian experiments, it is not possible to think in terms of interactions with the entity.

Thus, reference to interactions, interventions and capacities can be eliminated according to both the Received View and the accounts of Harré and Bohr. Based on the discussion in section 7.2.4, we see that physicists are considered to be passive observers of the world on these positions and that the screen model of science gives a good description of the epistemological model these philosophers presuppose.

Opposed to these positions are the ideas of Hacking and Cartwright. They have argued that causal reasoning in terms of interactions, interventions and capacities plays an important role in scientific experimentation. Although the theoretical entities are not directly observable, it is possible to see the effects of interactions with these entities in experiments. The epistemological model these philosophers seem to presuppose is the laboratory model of science. This model puts more emphasis on active participation in the world and aims to account for reasoning based upon consequences of interactions. In this model of science, causation is not considered to be merely the observation of a relationship. It is a description and interpretation of the consequences of our interactions in experimenting, i.e. it is based on interventions, interactions and capacities. These can be modelled using the four different models characterized by Boon: the nomo-mathematical, mechanistic, diagrammatic and experimental model.

In section 6.4.3, I analysed whether the laboratory model of science is a better description of scientific practice than the screen model of science, i.e. whether the scientific practice can better be described as observing phenomena or as acquiring knowledge from interventions. In this, I have concluded that interventions seem to play an important role in scientific experiments and, thus, that the laboratory model may provide a better description of scientific practice. In the following, I will further investigate this issue.

If the laboratory model of science provides a good description of scientific practice, it is possible to reconstruct the scientific practice in terms of nomo-mathematical, mechanistic, diagrammatic and experimental models. Hence, I will reconstruct the case study in terms of these four models, in which interactions, interventions and capacities are ineliminable. I will explore whether we get a better description of how experiments are designed and interpreted by reconstructing scientific practice in this way.

7.3.2 The HD-model

A well-known philosopher of the Received View, Carl Gustav Hempel, constructed the HD-model of science, in which he argues that experimental consequences can be deductively obtained from hypotheses. A graphical representation of the HD-model can be found in figure 7.1. From this figure it can be seen that two steps can be characterized in designing an experiment to test a certain theory. In the following, I will make use of this distinction.

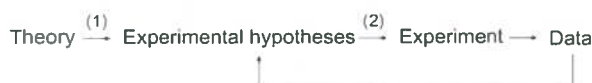


Figure 7.1: Scheme of the HD-model of science

First, the experimental hypotheses have to be obtained from the theory. The Received View argued that because the correspondence rules are part of the theory and link the theoretical and observational terms, experimental hypotheses can simply be deductively obtained from theory. Furthermore, they generally argued that universal laws used in this can be understood as regularities, i.e. that reference to primitive causal notions can be eliminated in these along the lines of Hume's analysis. Cartwright, however, disagrees with the Received

View on both points. She argued that even in the construction of a mathematical model, which is an important part of obtaining experimental hypotheses, non-deductive steps must be taken. According to her, in order to take these steps, we are forced to make use of causal reasoning in terms of entities with capacities. Her argument is explained in more detail in section 7.3.4, including its application to the case study.

The second step in the design of the experiment is the *actual* design of the experimental set-up and procedures for (hopefully) yielding the predicted experimental consequences. In section 7.3.3, I analyse how the experiment testing Bell's inequalities is designed and focus on how the experimental model is constructed. Harré argued that in modern scientific experiments, it is not possible to ontologically separate entity and instrument. If this is the case, in designing the experiment, we can only have knowledge about what experimental outcomes the experiment will have under certain conditions; it is not possible to give a causal story of how the state of the entity changed into some other state due to interactions. Hence, it is not possible to have causal explanations of why the experiment gives a certain outcome in terms of entities and interactions; it is only possible to have explanations for this in terms of universal laws and correlations. However, we can ask ourselves whether this is a good description of the scientific practice. Looking at actual scientific practices, physicists seem to reason in terms of ontologically distinct theoretical entities and instruments and in terms of the causal behaviour of entities. Therefore, in section 7.3.3 I address the question of whether the ontological separation between entity and instrument made by physicists is essential in constructing the experimental model or whether it only serves a heuristic purpose and is eliminable in reconstructing science.

7.3.3 The design of the experiment: ontologically separating instrument and entity

In this section, I analyse the *actual* design of the experiment, focusing on how the experimental model can be constructed.

In the design of the experiment, physicists seem to reason in terms of ontologically distinct instruments and entities. The experimental set-up is modelled together with the method we intend to use to test the experimental hypothesis, i.e. an experimental model is constructed. We have seen that, according to Harré, the reasoning by physicists in terms of ontologically distinct entities and instruments can only be heuristic since it is not possible to ontologically separate entity and instrument in modern scientific experiments. We can ask ourselves whether Harré's approach is indeed a good description of scientific practice, i.e. whether the construction of the experimental model can indeed be rationally reconstructed in such a way that reference to primitive causal notions is eliminated.

Assuming that we accept the idea that we are dealing with a Bohrian experiment, i.e. that it is not possible to ontologically separate instrument and entity, the experiment would have to be considered to be a black box. If this is the case, it is not possible to have any knowledge about causal interactions between the entity, the instrument and the outside world. Performing experiments, we obtain experimental results. In Bohrian experiments, however, it is not possible to have knowledge about why these experimental results are obtained; it

is only possible to obtain knowledge about correlations and not about causal relations. Hence, theory and experimental results can only be linked by means of a nomo-mathematical model.

Thus, when we are dealing with a Bohrian experiment, the experimental model should be constructed using only knowledge from the nomo-mathematical model together with empirical knowledge. However, when trying to construct the experimental model this way, we come across a problem. Because the instrument is considered to be a black box, it is not possible to have any knowledge about causal interactions between instrument and entity. Without this knowledge, we can have absolutely no grounds on which to design a particular instrument: we have to assume that the instrument is simply there. Therefore, it is not possible to construct an experimental model using only empirical knowledge and knowledge from nomo-mathematical models; mechanistic and diagrammatic models are needed to model the causal behaviour of the entities in the instrument.

7.3.4 Obtaining experimental hypotheses

In the previous section, I showed that for the case study we need the other three models, i.e. nomo-mathematical, mechanistic and diagrammatic models, in order to construct the experimental model and actually design the experiment. In this section, I will take another perspective and analyse how experimental hypotheses are obtained from theory.

The experimental hypothesis in the case study is that if entanglement is a property of electrons, positive correlations will be measured at the end of the leads, i.e. that if the electrons had been entangled, we would expect the detectors at the end of the leads to detect the electrons at the same time and with opposite spin. In obtaining this experimental hypothesis, two steps can be characterized. First, a nomo-mathematical model is constructed, applying the theoretical laws to a specific physical situation. Second, the experimental hypotheses are obtained from this nomo-mathematical model. According to the Received View, both steps are purely deductive and, since the universal laws can be understood in terms of regularities, reference to primitive causal notions can be eliminated. However, Cartwright has argued that experimental hypotheses are not simply deductively entailed by the theory. According to her, instead a sequence of model building is essential. This sequence culminates in the construction of an experimental model, and the experimental hypotheses can be obtained from this experimental model. In this model-building sequence, a mechanistic model must be constructed. The crucial role of the mechanistic model in the sequence is described in more detail on the next page. Building this mechanistic model, unsurprisingly, requires candidate physical mechanisms, i.e. it requires the use of reasoning in terms of entities with capacities. Thus, according to Cartwright, such reasoning in terms of entities with capacities is ineliminable in obtaining experimental hypotheses.

Analysis of the construction of the nomo-mathematical model

In this section, I focus on how the nomo-mathematical model leading to the prediction of entanglement is obtained from fundamental physical laws. The fundamental physical law in the case study is Schrödinger's equation. In chapter

5, I analysed whether the nomo-mathematical model of entanglement can be deductively obtained from this equation. In the construction of the nomo-mathematical model, I have found two non-deductive steps in which ineliminable use is made of reasoning in terms of entities with capacities.

As I described in section 7.2, an important part of theory consists in uninterpreted axioms and fundamental physical laws. In constructing nomo-mathematical models, physicists provide the different variables of the theory with physical interpretations. The result is a nomo-mathematical model which consists of a set of physically interpreted equations. In constructing the nomo-mathematical model of entanglement, the different variables in Schrödinger's equation are physically interpreted. In this, m is interpreted to be the mass, t to be the time, $\vec{r}$ to be the position, E to be the energy and V to be the potential energy.

Physically interpreting the abstract variables, they are given physical meaning, i.e. they are now about something we presuppose to exist in the world. Therefore, this physical meaning cannot just be given arbitrarily; there needs to be a reason why we interpret the variables in a certain way. Hence, to be able to physically interpret the abstract variables of the theory, we have to presuppose a carrier which holds the physically interpreted variables together, i.e. a carrier which localizes them in space and time. Therefore, in the case study in which the variables in Schrödinger's equation are physically interpreted, we have to presuppose an entity with properties and capacities, e.g. that it has a certain mass, position, kinetic energy and potential energy at a given time. Thus, we have to construct a mechanistic model of the behaviour of the entity with these properties and capacities. In the case study, this entity is the (entangled) electron (pair). From this, it can be concluded that in the physical interpretation of the variables from the theory, the use of a mechanistic model, i.e. reasoning in terms of entities with capacities, is ineliminable. Thus, in constructing the nomo-mathematical model, the construction and use of a mechanistic model is essential.

Further analysing the construction of the nomo-mathematical model, a second example of reasoning in terms of entities with capacities can be found in the construction of the potential term. The potential term represents the forces or fields acting on a system. Thus, solving Schrödinger's equation with a certain potential term will give us specific information about how the state of a system changes over time interacting with its environment.

To design the potential term, information is needed about the environment the system is placed in and the influence this can have on the state of the system, for example whether other particles are present with which interactions can take place or whether external fields influencing the state of the system are present. For each of these cases, simple potential terms exist which can be used to give a good description of the specific physical situation that the system is subjected to. Thus, to be able to construct the potential term describing the environment the system is placed in, knowledge about the behaviour of these sorts of systems in these types of environments, i.e. knowledge of capacities, has to be used. As I described in section 7.2.3, the diagrammatic model models the behaviour of an entity in space and time, i.e. in specific physical conditions. Thus, to design the potential term, a diagrammatic model has to be constructed. The diagrammatic model represents entities with capacities which can exert themselves in certain conditions. Therefore, it is not possible to construct a diagrammatic model

without reference to a mechanistic model, i.e. an entity *has* to be presupposed to be able to construct this model.³ Thus, in constructing the potential term, the construction and use of a diagrammatic as well as a mechanistic model are essential.

From the analysis above, it can be concluded that, in the derivation of entanglement, to be able to construct the nomo-mathematical model we also have to construct a mechanistic and a diagrammatic model. In constructing these latter two models, we have to presuppose an entity with capacities with which we can intervene. Hence, it can be concluded that causal reasoning in terms of interactions is ineliminable in the construction of the nomo-mathematical model.

Analysis of the obtainment of the experimental hypotheses

Having constructed the nomo-mathematical model of entanglement, we have obtained a wave function in which two particles are in a superposed state, i.e. their states are mutually dependent. For entangled electrons, this is represented by the following equation:

$$|e^-, e^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_{e^-} \downarrow_{e^-}\rangle \pm |\downarrow_{e^-} \uparrow_{e^-}\rangle) \quad (7.2)$$

It is not possible to directly test this mathematical result; experimental hypotheses have to be obtained from this equation. The experimental hypothesis in the case study is that if entanglement is a property of electrons, positive correlations will be measured at the end of the leads, i.e. that if the electrons had been entangled, we would expect the detectors at the end of the leads to detect the electrons at the same time and with opposite spin. According to the Received View, experimental hypotheses are deduced by applying the correspondence rules to the theoretical terms in the mathematical formulae. For the case study, I have analysed how the experimental hypothesis is obtained from the nomo-mathematical model.

To obtain the experimental hypothesis from formula 7.2, physicists use additional information like the fact that electrons can be spatially separated without losing their entanglement, that they can travel through metal leads by applying a voltage over these leads, and that if they are entangled they travel with equal velocities through the leads, i.e. they use knowledge about the behaviour of the entity in the experimental set-up. This knowledge can be obtained by constructing an experimental model.

As I described in section 7.2.3, knowledge about the experimental set-up as well as knowledge about the behaviour of the entities in this set-up is modelled in the experimental model. As I concluded in section 6.4.2, it is the experimental model which is tested in the experiment. Because the experimental model describes the behaviour of an entity in an experimental set-up, it is not possible to construct an experimental model without reference to a mechanistic model, i.e. in constructing the experimental model, we need to presuppose an entity with capacities and construct a mechanistic model for this. The Received View

³I recognize that some anti-realists may use these models instrumentally, but at least in doing so they are helping themselves to causal reasoning. This implies that causal reasoning might indeed be necessary in scientific reasoning, even if they are nevertheless anti-realist about the entities they are reasoning with.

held that this postulation of an entity is purely heuristic and that it is eliminable in reconstructing science. However, the entity postulated exerts certain capacities with which it is possible to intervene in experiments. Thus, the postulation of theoretical entities can not only be heuristic; it is ineliminable because it is necessary in connecting theory with experiment.

From this, it can be concluded that the experimental hypothesis cannot be deductively obtained from the theory; in obtaining this hypothesis non-deductive steps have to be taken in which we are forced to make use of reasoning in terms of entities with capacities. I have shown that all four models are needed in obtaining the experimental hypothesis. First, as I described in section 7.3.4, the construction of the nomo-mathematical model is not deductive: a mechanistic and a diagrammatic model have to be constructed as well. Second, as I described in section 7.3.4, experimental consequences cannot be deductively obtained from the nomo-mathematical model. To obtain these experimental hypotheses, an experimental model has to be constructed. To construct an experimental model, we have to make use of knowledge from a mechanistic model as well.

Thus, in obtaining the experimental hypothesis, non-deductive steps have to be taken in which reasoning in terms of entities with capacities with which we can intervene is ineliminable. In this, all four kinds of models defined by Boon have to be constructed, modelling these entities with capacities and the way we can intervene with them. From this, it can be concluded that reference to primitive causal notions cannot be eliminated in reconstructing the obtainment of experimental hypotheses.

Bibliography

- Achinstein, P. 1968. *Concepts of Science*. Baltimore, Md.: Johns Hopkins University Press.
- Achinstein, P. 2002. The Grue Paradox. *Pages 307–320 of: Balashov, Y, & Rosenberg, A. (eds), Philosophy of Science, contemporary readings*. London and New York: Routledge, Taylor and Francis Group.
- Aczel, A.D. 2002. *Entanglement: The Greatest Mystery in Physics*. New York: Four Walls, Eight Windows.
- Andreev, A.F. 1964. Thermal conductivity of the intermediate state of superconductors. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **46**, 1823. Also published in: *Sov. Phys. JETP* 19, 1228, (1964).
- Aspect, A., Grangier, P., & Roger, G. 1981. Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem. *Phys. Rev. Lett.*, **47**(7), 460–463.
- Bailer-Jones. 2004. *Models in Philosophy of Science*. Pages 1–22, 93–122, 145–180.
- Baird, D. 2003. Thing Knowledge, outline of a materialist theory of knowledge. *Pages 39–66 of: Radder, H. (ed), The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Beckmann, D., & Weber, H.B. 2004. Evidence for Crossed Andreev Reflection in Superconductor-Ferromagnet Hybrid Structures. *Phys. Rev. Lett.*, **93**(19), 197003.
- Bell, J.S. 1964. On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. *Physics*, **1**, 195–200.
- Bell, J.S. 1966. On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. *Review of Modern Physics*, **38**(3), 447–452.
- Besançon, R.M. (ed). 1990. *The Encyclopedia of Physics*. Vol. Third Edition. New York: Van Nostrand Reinhold. Pages 714–716.
- Bignon, G., Houzet, M., Pistolesi, F., & Hekking, F.W.J. 2004. Current-current correlations in hybrid superconducting and normal-metal multiterminal structures. *Europhys. Lett.*, **67**(1), 110–116.
- Blaauboer, M. 2005. De Bell-ongelijkheid testen met elektronen. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, oktober, 308–311.

- Blanter, Ya. M., & Büttiker, M. 1997. Shot-noise current-current correlations in multiterminal diffusive conductors. *Phys. Rev. B*, **56**(4), 2127-2136.
- Blonder, G.E., Tinkham, M., & Klapwijk, T.M. 1982. Transition from metallic to tunneling regimes in superconducting microconstrictions: Excess current, charge imbalance, and supercurrent conversion. *Phys. Rev. B*, **25**(7), 4515-4532.
- Bohr, N. 1935. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.*, **48**, 696-702.
- Boltzmann, L. 1902. Model. *Pages 788-791 of: Encyclopaedia Britannica*, vol. XXX. London: "The Times" Printing House 10th Edition. Also in: Cambridge University Press. 11th Edition, 1911, Bd. 18, 638-640; Theoretical Physics and Philosophical Problems, Dordrecht Reidel Publishing Company, 1974, p. 213-220.
- Boon, M. 2004. Review article, Technological instruments in scientific experimentation. *International studies in the Philosophy of Science*, **18**(Nos. 2 & 3), 221-230.
- Boon, M. 2006a. Explanation in *Practical Sciences: Inventing Entities*.
- Boon, M. 2006b. How science is applied in technology. *International studies in the Philosophy of Science*, **20**(1), 27-47.
- Boon, M. 2006c. Laws in Scientific Practice: Against Humean Empiricism.
- Bouchiat, V., Chtchelkatchev, N., Feinberg, D., Lesovik, G.B., Martin, T., & Torres, J. 2002. Single Carbon Nanotube-Superconductor Entangler: noise correlations and EPR states. *Nanotechnology*, **14**(1), 77-85.
- Brinkman, A. 2003. *Charge transport in double-barrier and magnesiumboride Josephson junctions*. Ph.D. thesis, Twente University.
- Cartwright, N. 1983. *How the laws of physics lie*. Oxford: Oxford University Press.
- Cartwright, N. 1989. *Natures capacities and their measurement*. Oxford: Clarendon Press.
- Cartwright, N. 1999. *The Dappled World, A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Chtchelkatchev, N.M., Blatter, G., Lesovik, G.B., & Martin, T. 2002. Bell inequalities and entanglement in solid-state devices. *Phys. Rev. B*, **66**, 161320(R).
- Clifton, R. 1996. The Properties of Modal Interpretations of Quantum Mechanics. *British Journal of Philosophy of Science*, **47**, 371-398.
- Deutscher, G. 2002. Crossed Andreev Reflections. *Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism*, **15**(1), 43-47.
- Deutscher, G., & Feinberg, D. 2000. Coupling superconducting-ferromagnetic point contacts by Andreev reflections. *Appl. Phys. Lett.*, **76**(4), 487-489.

- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. 1935. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.*, **47**, 777–780.
- Falci, G., Feinberg, D., & Hekking, F.W.J. 2001. Correlated tunneling into a superconductor in a multiprobe hybrid structure. *Europhys. Lett.*, **54**(2), 255–261.
- Faye, Jan. 2002. Copenhagen Interpretation of Quantum Physics. In: Zalta, Edward N. (ed), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/qm-copenhagen/>.
- Feinberg, D. 2003. Andreev scattering and cotunneling between two superconductor-normal metal interfaces: the dirty limit. *Eur. Phys. J. B*, **36**, 419–422.
- Giere, R.N. 1979. *Understanding Scientific Reasoning*. Vol. 4. ed. New York: Holt, Rinehard and Winston. Pages 21–27, 35–42.
- Giroud, M., Hasselbach, K., Courtois, H., Mailly, D., & Pannetier, B. 2003. Electron transport in a mesoscopic superconducting ferromagnetic hybrid conductor. *Eur. Phys. J. B*, **31**, 103–109.
- Glatthli, D.C., Jacques, P., Kumar, A., Pari, P., & Saminadayan, L. 1997. A noise detection scheme with 10 mK noise temperature resolution for semiconductor single electron tunneling devices. *Journal of Appl. Phys.*, **81**(11), 7350–7356.
- Griffiths, D.J. 1987. *Introduction to elementary particles*. USA and Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Hacking, I. 1983. *Representing and Intervening, Introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Harré, R. 1972. *The Philosophies of Science*. New York: Oxford University Press. Pages 173–183.
- Harré, R. 2003. The Materiality of Instruments in a Metaphysics for Experiments. Pages 19–38 of: Radder, H. (ed), *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Hempel, C. 1965. *Aspects of Scientific Explanation*. New York: Free Press.
- Hempel, C.G. 1966. *Philosophy of natural science*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Hempel, C.G. 2002. Two Models of Scientific Explanation. Pages 45–55 of: Balashov, Y, & Rosenberg, A. (eds), *Philosophy of Science, contemporary readings*. London and New York: Routledge, Taylor and Francis Group.
- Hesse, M. 1967. Models and Analogy in Science. Pages 354–359 of: *Part 5 of The Encyclopedia of Philosophy*. New York: Macmillan.
- Hume, D. 1739 (n.d.). *A Treatise of Human Nature: Being An Attempt to Introduce the Experimental Method of Reasoning Into Moral Beings, Part 3, Of Knowledge and Probability*. <http://www.class.uidaho.edu/mickelsen/texts/Hume%20Treatise/hume%20treatise1.htm#PART%20III>.

- Hume, D. 1748 (2001). *An Enquiry Concerning Human Understanding, Chapter 7: Of the Idea of necessary Connection*. Bartleby.com: The Harvard Classics.
- Jehl, X., Payet-Burin, P., Baraduc, C., Calemczuk, R., & Sanquer, M. 1999. Superconducting quantum interference device based resistance bridge for shot noise measurement on low impedance samples. *Rev. of Scientific Instruments*, **70**(6), 2711–2714.
- Ladyman, J. 2002. *Understanding Philosophy of Science*. London and New York: Routledge, Taylor and Francis Group.
- Lange, M. 2002. *The philosophy of physics, Locality, Fields, Energy, and Mass*. Malden, MA, USA; Oxford; Carlton, Australia: Blackwell publishing Ltd.
- Lange, R. 2003. Technology as Basis and Object of Experimental Practices. *Pages 119–137 of: Radder, H. (ed), The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Lebedev, A.V., Lesovik, G.B., & Blatter, G. 2004. Entanglement in a Noninteracting Mesoscopic Structure. *Phys. Rev. B*, **71**(4), 045306.
- Lesovik, G.B., Martin, T., & Blatter, G. 2001. Electronic entanglement in the vicinity of a superconductor. *Eur. Phys. J. B*, **24**, 287–290.
- Martin, T., Crepieux, A., & Chtchelkatchev, N. 2002. Noise correlations, entanglement, and Bell inequalities. *arXiv: cond-mat/0209517v1*.
- Melin, R. 2001a. Detection of non separable correlations with dc transport: a new type of Aharonov-Bohm effect. *arXiv: cond-mat/0011364v2*.
- Melin, R. 2001b. Electronic EPR-like experiments with superconductors. *arXiv: cond-mat/0105073v1*.
- Melin, R. 2005. Long range statistical fluctuations of the crossed Josephson current. *arXiv: cond-mat/0505211v1*.
- Melin, R., & Feinberg, D. 2004. Sign of the crossed conductances at a ferromagnet/superconductor/ferromagnet double interface. *Phys. Rev. B*, **70**, 174509.
- Moehring, D.L., Madsen, M.J., Blinov, B.B., & Monroe, C. 2004. Experimental Bell Inequality Violation with an Atom and a Photon. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 090410.
- Morrison, M., & Morgan, M.S. 1999. *Models as Mediators, perspectives on natural and social science*. Cambridge: Cambridge University Press. Pages 1–37.
- Nagel, E. 1961. *The Structure of Science, Problems in logic of scientific explanation*. New York, London: Routledge & Kegan Paul. Pages 90–117.
- Prada, E., & Sols, F. 2004. Entangled electron current through finite size normal-superconductor tunneling structures. *Eur. Phys. J. B*, **40**(4), 379–396.

- Radder, H. (Ed.). 2003. *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh, Penn.: University of Pittsburgh Press.
- Railton, P. 1981. Probability, explanation, and information. *Synthese*, 48(2), 233–256.
- Recher, P., Saraga, D.S., & Loss, Daniel. 2004. Creation and detection of mobile and non-local spin-entangled electrons. *arXiv: cond-mat/0408526v1*.
- Rodgers, P. 2002. *The double-slit experiment*. <http://physicsweb.org/articles/world/15/9/1/1>.
- Russo, S., Kroug, M., Klapwijk, T.M., & Morpurgo, A.F. 2005. Experimental observation of bias-dependent non-local Andreev reflection. *arXiv: cond-mat/0501564v1*.
- Salmon, W.C. 1989. Four Decades of Scientific Explanation. Pages 3–25, 33–60, 117–150 of: Kitcher, P., & Salmon, W.C. (eds), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science, volume xiii, Scientific Explanation*. Minneapolis: University of Minnesota.
- Salmon, W.C. 2002. Scientific Explanation: Causation and Unification. Pages 92–105 of: Balashov, Y., & Rosenberg, A. (eds), *Philosophy of Science, contemporary readings*. London and New York: Routledge, Taylor and Francis Group.
- Schrödinger, E. 1980. The present situation in quantum mechanics: A translation of Schrödinger's "cat paradox paper". Translator: John D. Trimmer; <http://www.tu-harburg.de/rzt/rzt/it/QM/cat.html#sect5>.
- Suppe, F. 2004. Models and Analogies. *Models in Science and Technology, Reader Workshop 15 and 16 April 2004, Conferentiecentrum 'Soeterbeeck', Raventein (Noord-Brabant), van: Vlaams-Nederlands Netwerk voor de Filosofie van Wetenschap en Technologie (NFWT)*.
- Suppe, Frederick. 1974. *The structure of scientific theories*. 1979 (second printing) edn. Urbana: University of Illinois Press. Pages 16–52.
- Taddei, F., & Fazio, R. 2002. Positive cross-correlations induced by ferromagnetic contacts. *Phys. Rev. B*, 65(13), 134522.
- Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., & Kawasaki, T. 1989. Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *American Journal of Physics*, 57(2), 117–120.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2005a (17 September 2005). *Cooper pair*. http://en.wikipedia.org/wiki/Cooper_pair.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2005b (29 September 2005). *Copenhagen interpretation*. http://en.wikipedia.org/wiki/Copenhagen_interpretation.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2005c (28 September 2005). *Interpretations of quantum mechanics*. http://en.wikipedia.org/wiki/Interpretations_of_quantum_mechanics.

- Wikipedia, the free encyclopedia. 2005d (5 Oktober 2005). *Leon Neil Cooper*. http://en.wikipedia.org/wiki/Leon_Neil_Cooper.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006a (31 July 2006). *Density matrix*. http://en.wikipedia.org/wiki/Density_matrix.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006b (30 March 2006). *Erwin Schrödinger*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Schrodinger>.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006c (9 June 2006). *Fabry-Pérot interferometer*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Fabry-Perot>.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006d (12 October 2006). *Grue (color)*. http://en.wikipedia.org/wiki/Grue_%28color%29.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006e (25 July 2006). *Ignaz Semmelweis*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Semmelweis>.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006f (31 Juli 2006). *Ignaz Semmelweis*. http://nl.wikipedia.org/wiki/Ignaz_Semmelweis.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006g (24 Maart 2006). *Interpretatie*. <http://nl.wikipedia.org/wiki/Interpretaties>.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006h (20 August 2006). *Potential energy*. http://en.wikipedia.org/wiki/Potential_energy.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006i (16 June 2006). *Problem of induction*. http://en.wikipedia.org/wiki/Problem_of_induction.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006j (26 February 2006). *Quantum decoherence*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Decoherence>.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006k (18 March 2006). *Superposition principle*. http://en.wikipedia.org/wiki/Superposition_principle.
- Zeilinger, A. 1996. On the Interpretation and Philosophical Foundation of Quantum Mechanics. In: *Vastakohtien todellisuus, Festschrift for K.V. Laurikainen, U. Ketvel et al. (Eds.)*. Helsinki University Press.
- Zeilinger, A. 1999. A Foundational Principle for Quantum Mechanics. *Foundations of Physics*, **29**(4), 631–643.