

Welle-Teilchen-Dualismus am Beispiel der **„wechselwirkungsfreien“ Messung :**

1. Der Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers.
2. Grundidee der „wechselwirkungsfreien“ Messung.
3. Voraussagen mit der Wellen- bzw. der Teilchenvorstellung.
4. Vergleich der Voraussagen mit dem Realexperiment.
5. Umwandlungen der Modellvorstellungen.
6. Quantenphysikalische Klärung des Experimentes.

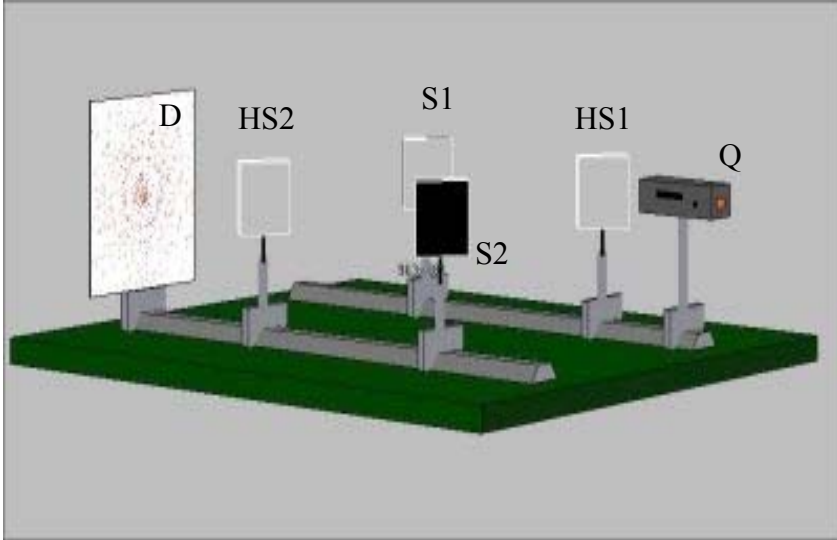
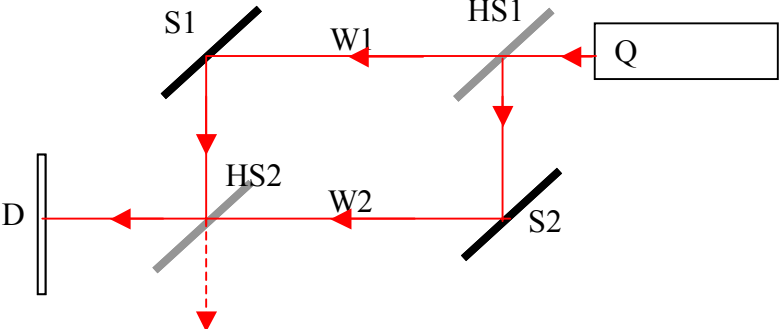
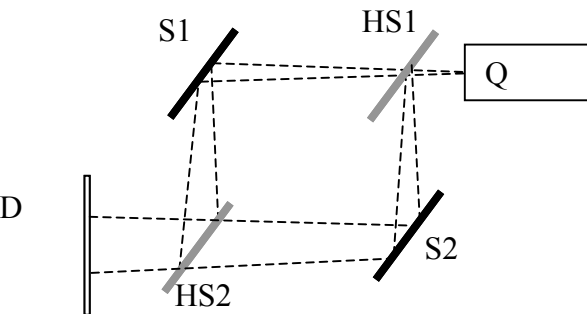
Anhang : Verbesserung der Effektivität bei der „wechselwirkungsfreien“ Messung.

Literatur.

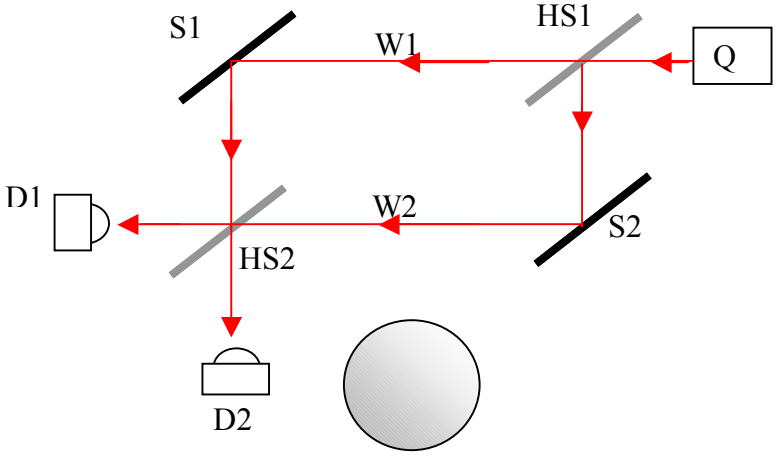
Welle-Teilchen-Dualismus :

am Beispiel : „Wechselwirkungsfreie“ Messung.

1: Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers (1892):

Aufbau :	Beschreibung
	<p>Q: Lichtquelle: Laser</p> <p>HS1 und HS2 : Ideale Halbdurchlässige Spiegel</p> <p>S1 und S2 : Ideale Spiegel</p> <p>D : Detektor. Hier Schirm</p>
	<p>Die beiden Lichtwege</p> <p>W1: Q-HS1-S1-HS2-D</p> <p>und</p> <p>W2 : Q-HS1-S2-HS2-D</p> <p>sind bei gleichen Spiegelabständen gleich.</p> <p>⇒ Gangunterschied 0</p> <p>⇒ konstruktive Interferenz.</p>
	<p>Punkte auf dem Schirm, die nicht auf der optischen Achse liegen werden entlang von Wegen erreicht, die Gangunterschiede haben. So entsteht auf dem Schirm ein punktsymmetrisches Interferenzbild.</p>

2: Grundidee der wechselwirkungsfreien Messung (1993 von A-Elitzur und L.Vaidman, Uni Tel Aviv) .

Aufbau :	Beschreibung
 <p>The diagram shows a quantum optical setup. A source 'Q' emits a photon that travels along path 'W1'. It reaches a beam splitter 'HS1'. From 'HS1', the photon can either go to detector 'D1' or reflect to path 'W2'. Path 'W2' contains a circular object. At a second beam splitter 'HS2', the photon can either go to detector 'D2' or reflect back to path 'W1'. Red arrows indicate the possible paths of the photon.</p>	<p>Der gesamte Versuch findet in totaler Dunkelheit statt.</p> <p>Die Quelle wird ersetzt durch eine Quelle, die einzeln unterscheidbare Photonen liefert</p> <p>Anstatt des Schirms werden zwei Detektoren, die Einzelphotonen nachweisen können benutzt.</p> <p>Im Lichtweg W2 befindet sich vielleicht ein Gegenstand, (Detektor, Knaller,...) der bereits reagiert, wenn er nur etwas Energie zugeführt bekommt.</p>
<p>Ist es möglich herauszubekommen, ob sich der Gegenstand in der Apparatur befindet, ohne ihn zur Reaktion zu bringen (d.h., ohne dass ein Photon Energie oder Impuls mit dem Gegenstand austauscht)?</p>	

3A: Voraussagen ohne Knaller?

<p>Wellenvorstellung :</p> <p>a) gar nicht anwendbar, weil nur 1 Photon in der Anordnung ist ? b) Welle interferiert wie bekannt. ⇒ konstruktive Interferenz bei D1 (s.o.).</p> <p>Lichtwege zu D2: Über W1 : Eine S-Reflexion, zwei HS – Durchgänge: ⇒ Phasensprung π. Über W2: Eine S-Reflexion, zwei HS-Reflexionen ⇒ Phasensprung 2π. (Reflexion an HS gibt $\pi/2$-Phasensprung [2,S.21 ff])</p> <p>⇒ Gangunterschied π ⇒ destruktive Interferenz</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin-top: 10px;"> ⇒ Nur D1 klickt D2 bleibt stumm. </div>	<p>Teilchenvorstellung :</p> <p>Jedes Photon wird mit der Wahrscheinlichkeit 50% an einem halbdurchlässigen Spiegel reflektiert oder durchgelassen.</p> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> </div> <p>⇒ D1 klickt in 50% der Fälle. D2 klickt in 50% der Fälle.</p>

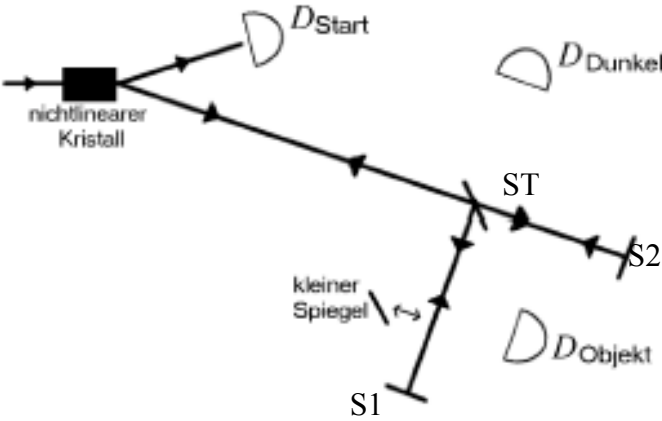
3B: Voraussagen mit Knaller:

<p>Wellenvorstellung :</p> <p>a) gar nicht anwendbar, weil nur 1 Photon in der Anordnung ist ?</p> <p>b) Die Welle teilt sich am ersten Strahlteiler. Die Welle, die sich auf den Weg 2 macht, löst den Knaller aus.</p> <p>⇒ in 100% aller Versuche erfolgt ein Knall..</p>	<p>Teilchenvorstellung :</p> <p>Jedes Photon wird mit der Wahrscheinlichkeit 50% an einem halbdurchlässigen Spiegel reflektiert oder durchgelassen.</p> <p>⇒ D1 klickt in 25% der Fälle. D2 klickt in 25% der Fälle. in 50% aller Fälle erfolgt ein Knall.</p>

3 C: Gegenüberstellung der Voraussagen :

	Wellenvorstellung	Teilchenvorstellung
A: Ohne Knaller	Nur D1 klickt. D2 klickt nie.	D1 und D2 klicken jeweils in 50%
B: mit Knaller	Jedes Mal Knall	Knall in 50% der Fälle. D1 und D2 klicken in jeweils 25%.
	(oder: Kommt gar nicht in betracht)	

4. Realisierung: Kwiat, Weinfurter, Zeilinger und Herzog 1995 an der Uni Innsbruck.

Aufbau	Beschreibung
	<p>Erzeugung eines Photonenpaares durch schwachen Laserpuls auf Kristall.</p> <p>D_{Start}: Nachweis eines Photons dieses Paares.</p> <p>Durch Abgleich mit D_{Start} kann das Detektorrauschen von D_{Dunkel} herausgefiltert werden.</p> <p>Michelson Interferometer mit 2 idealen Spiegeln S1, S2 und Strahlteiler ST.</p>
Versuchsergebnisse	
ohne kleinen Spiegel	D_{Dunkel} klickt nicht (wenn es entsprechend so justiert ist) Konstruktive Interferenz im Rückstrahl
mit kleinem Spiegel	D_{Dunkel} klickt in 25% der Fälle. D_{Objekt} klickt in 50% aller Fälle.

Fazit :

Beide Modellvorstellungen sind nicht dazu geeignet, die Ergebnisse der obigen, fast identischen Versuche, richtig vorauszusagen.

Man ist gezwungen von den, in Optik, Mechanik und Akustik sehr bewährten, viel geübten, intuitiven Vorstellungen von Wellen und Teilchen abzugehen

5.A.Umwandlung der Wellenvorstellung	
Nur D1 klickt. D2 klickt nie.	Jedes Mal Knall
Konstruktive Interferenz in D1	Teilung der Welle an HS1
Destruktive Interferenz in D2	Auslösung des Knallers von der Teilwelle

Konsequenzen für die Wellenvorstellung:

Klassische Vorstellungen :	Quantenvorstellungen :
Licht ist elektromagnetische Welle..	Licht hat Wellencharakter (Interferenz), d.h. raum-zeitliche Periodizität.
E hat eine reale, messbare Bedeutung E-Amplitude ist reelle Größe. Reale Wirkung auf Knaller	ψ -Wellen. ψ hat keine reale, messbare Bedeutung. Amplitude ist komplexe Zahl (die wir als Zeiger darstellen) ψ wirkt nicht auf Knaller
Intensität ist proportional zu $ \vec{E} ^2$	Intensität ist proportional zu $ \psi ^2$
E determiniert an jedem Ort die Wirkung, auch am Knaller.	$ \psi ^2$ ist Antreffwahrscheinlichkeit von Teilchen an einem Ort. (Bornsche Deutung). $ \psi ^2$ determiniert nicht die Wirkung
Nach dem Huygensschen Prinzip kann man sich jede Welle aus Elementarwellen zusammengesetzt vorstellen, die sich ungestört überlagern.	Diese Zusammensetzung von (komplexen) Wellen, mit einer festen Phasenbeziehung nennt man in der Quantenphysik Superposition.

5.B.Umwandlung der Teilchenvorstellung	
D1 und D2 klicken jeweils in 50%	Knall in 50% der Fälle. D1 und D2 klicken in jeweils 25%.
Ein Photon geht entweder, mit 50% Wahrscheinlichkeit den Weg W1 oder mit 50% Wahrscheinlichkeit den Weg W2 zum HS2.	Ein Photon geht ab HS1 entweder, mit 50% Wahrscheinlichkeit den Weg W1 oder mit 50% Wahrscheinlichkeit den Weg W2, also zum Knaller.
Ein Photon, das nach HS2 kommt, geht ab HS2 entweder, mit 50% Wahrscheinlichkeit nach D1 oder mit 50% Wahrscheinlichkeit nach D2.	Ein Photon, das nach HS2 kommt, geht ab HS2 entweder, mit 50% Wahrscheinlichkeit nach D1 oder mit 50% Wahrscheinlichkeit nach D2.

Konsequenzen für die Teilchenvorstellung :

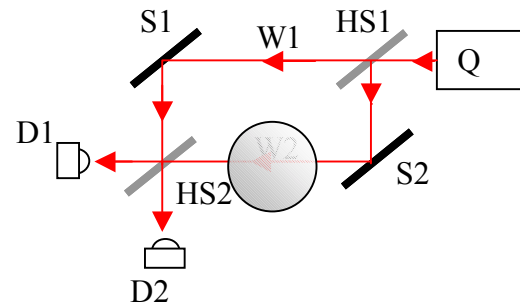
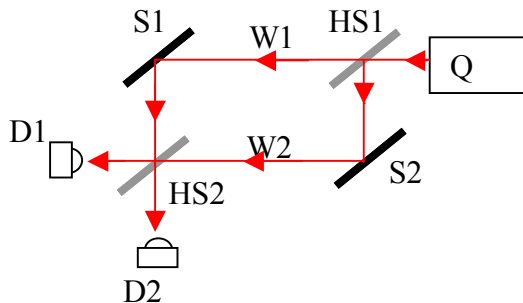
Klassische Vorstellungen :	Quantenvorstellungen :
Teilchen können nur lokal beeinflusst werden, durch Wirkungen, Felder, die an ihrem Ort sind.	Teilchen werden durch die gesamte Anordnung beeinflusst. Nichtlokalität
Teilchen befinden sich in einem kleinen Raumbereich Jedes Teilchen bewegt sich auf einer abgegrenzten Bahn.	Die eingezeichneten Wege stellen nur verschiedene Mögheitspfade dar. Ein einzelnes Teilchen interferiert, via ψ -Superpositionen, auf allen ununterscheidbaren Mögheitspfaden mit sich selbst. Gibt es nur einen Mögheitspfad von der Quelle, bis zum Ziel, dann gibt es keine Interferenz.

Fazit unseres Umwandlungsprozesses des Wellen- und des Teilchenbegriffes :

Die „Wellenamplitude“ hat keine eigenständige, physikalische Bedeutung. Sie hat nur noch eine Bedeutung als Zwischenschritt zur Vorhersage von Messergebnissen.

Das Teil-Chen (Partikel; Korpuskel) hat keine Realität als kleiner Teil des Raumes. Es muss, solange es nicht in einer Messung lokalisiert wurde, als nichtlokal in der Anlage gedacht werden. Das ist aber das Gegenteil eines Teil-Chens.

6. Theoretische Klärung des Knallerversuchs mit den Quantenbegriffen



Ein Photon geht von der Quelle durch die Anlage.

W1 und W2 sind je zwei ununterscheidbare Möglichkeitspfade für **ein** Photon zu D1 bzw. zu D2.

Entlang W1 rechnet man mit ψ_1 , entlang W2 mit ψ_2 . Die beiden Wellenfunktionen **eines** Photons sind an der Quelle in Phase.

Durch Superposition erhält man in D1 konstruktive Interferenz mit $|\psi_1 + \psi_2| = 1$, in D2 destruktive Interferenz mit $|\psi_1 + \psi_2| = 0$.

Antreffwahrscheinlichkeit in D1 : 100%;

Antreffwahrscheinlichkeit in D2 : 0%

Nur D1 klickt.
D2 klickt nie.

Es gibt jeweils nur einen Möglichkeitspfad zu den drei Zielen : D1, zu D2 und zum Knaller.

Liegt nur jeweils eine Möglichkeit vor, kann man nicht superponieren.
Keine Interferenz.

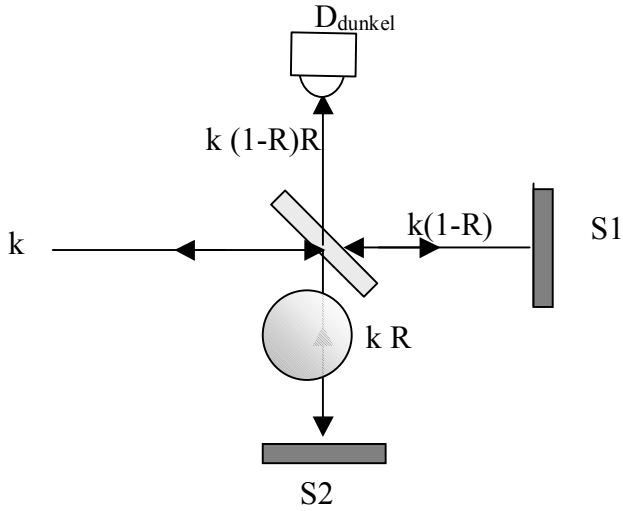
W1 und W2 werden mit gleicher Wahrscheinlichkeit durchlaufen.

D1 und D2 werden mit gleicher Wahrscheinlichkeit getroffen

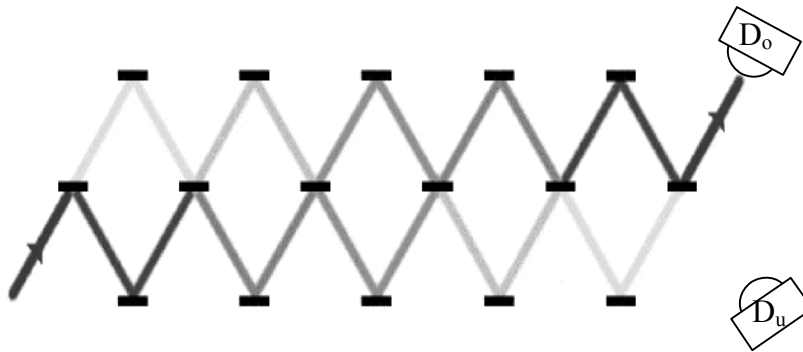
Knall in 50% der Fälle.

D1 und D2 klicken in jeweils 25%.

Anhang : Verbesserung der Effektivität der „wechselwirkungsfreien Messung :

<p>A. Michelson-Interferometer mit stark-durchlässigem Strahlteiler:</p> 	<p>Der Strahlteiler ST habe eine Reflektivität $R > 0$, d.h., die Wahrscheinlichkeit ein ankommendes Photon zu reflektieren ist R. Die Wahrscheinlichkeit durchzugehen ist $(1-R)$.</p> <p>$R = 0$... vollständig transparent $R = 1$... idealer Spiegel.</p> <p>Durch die Änderung von R wird auch der Phasensprung verändert.</p> <p>Trotzdem ist es durch Neujustierung sicher möglich in D_{dunkel} destruktive Interferenz zu erhalten.</p>
<p>Nun sei der Knaller wieder zwischen ST und S2. Die Quelle liefert k Photonen.</p> <p>Es gibt jetzt nur einen Weg zum Detektor D_{dunkel}. Deshalb findet keine Interferenz statt.</p> <p>Photonen am Knaller : $k \cdot R$ Photonen an S1 : $k(1-R)$ Photonen in D_{dunkel} : $k(1-R)R$</p> <p>\Rightarrow Effektivität = $\eta = \Rightarrow \frac{\text{Anzahl wwf-Nachweise}}{\text{Anzahl aller Nachweise}} = \frac{k(1-R) \cdot R}{k(1-R) \cdot R + k \cdot R} = \frac{1-R}{2-R}$</p> <p>Für das klassische Interferometer gilt : $R = \frac{1}{2}$: $\eta = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{2}{2}} = \frac{1}{2}$</p> <p>Verschiebt man R gegen Null, dann geht η gegen 0,5.</p> <p>Das heißt, der Nachweis des Knallers erfolgt dann etwa gleich oft durch wwf-Detektion wie durch Explosion.</p>	

B. Gekoppelte Mach-Zehnder-Interferometer (zunächst ohne Knaller)



N ideale Spiegel

N Strahlteiler mit hoher Reflektivität R

N ideale Spiegel

Voraussetzungen :

1. gleiche Wege
2. Durch Interferenz ist die Wahrscheinlichkeit für ein Photon nach D_0 zu gelangen so eingestellt, dass $P(D_u) = 0$

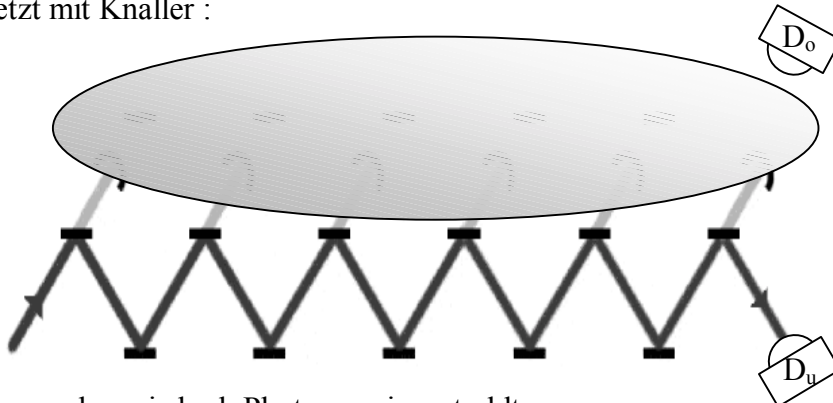
Dazu muss die Anzahl der Strahlteiler zum, durch die Reflektivität R bedingten, Gangunterschied passen.

Nach [2, S.11] ist diese Interferenz dann gegeben, wenn gilt:

$$R = \cos^2\left(\frac{\pi}{2N}\right)$$

D.h., je größer die Reflektivität R ist, desto größer muss auch N sein. Die Photonen brauchen dann mehr „Spiegeleien“, um nie nach unten zu gehen.

Jetzt mit Knaller :



Der Knaller absorbiert alle Photonen, die die Strahlteiler nach oben verlassen.

Es gibt nur einen Weg für Photonen vom Eingang zum Detektor D_u zu gelangen.

⇒ keine Interferenz.

Es werden wieder k Photonen eingestrahlt.

Nach jeder Reflexion an einem Strahlteiler vermindert sich die Anzahl der weiterfliegenden Photonen auf das R-fache.

Nach N Reflexionen ist also die Anzahl der Photonen, die in D_u ankommen $k \cdot R^N$. Die Anzahl der Photonen, die vom Knaller absorbiert werden ist dann $k - k \cdot R^N$.

$$\Rightarrow \text{Effektivität} = \eta = \frac{k \cdot R^N}{k \cdot R^N + (k - k \cdot R^N)} = R^N = \left[\cos^2\left(\frac{\pi}{2N}\right) \right]^N$$

Für $N = 10 \Rightarrow \eta = 0,78$; Für $N = 20 \Rightarrow \eta = \mathbf{0,99996}$

Im Experiment wurde 1997 im Los-Alamos-Nationallaboratorium eine **Effektivität von 70% erreicht**.

Quellen :

- [1]: Paul Kwiat, Harald Weinfurter und Anton Zeilinger: „Wechselwirkungsfreie Quantenmessung“; Spektrum der Wissenschaften 1/1997.
- [2]: Ralf Stütze : „Wechselwirkungsfreie Quantenmessung“; <http://www.uni-konstanz.de/quantum-optics/atomoptics/homepages/ralf/thausarb.pdf>