

# Kapitel 1

## Einleitung — Historische Übersicht

Wenn auch der Effekt der Phasenverschiebung von Wellen — sei es von elektromagnetischen oder von Materiewellen — in einem rotierenden Bezugssystem nach heutiger Sicht seine theoretischen Wurzeln tief in den Grundlagen der modernen Physik, nämlich der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie hat [Ana81a], bzw. sogar mit zur Begründung der Relativitätstheorie beiträgt [Rod83], reichen die ersten experimentellen wie theoretischen Arbeiten zu diesem Thema bis in die Zeit der Äther-Theorie zurück.

Bereits 1913 wies Georges SAGNAC [Sag13a,Sag13b,Sag14] die Phasenverschiebung von Lichtwellen in einem rotierenden Interferometer nach, in dem die beiden Teilwellen eine Fläche  $A > 0$  einschließen. Seine Intention bei diesem Experiment wie auch seine Interpretation der erfolgreich gemessenen Phasenverschiebung waren allerdings die des Nachweises der Existenz des Äthers als Träger der Lichtwellen [Sag13a]:

«L'effet interférentiel observé est bien l'effet tourbillonnaire optique dû au mouvement du système par rapport à l'éther et manifeste directement l'existence de l'éther, support nécessaire des ondes lumineuses de Huygens et de Fresnel.»

Auch wenn dieser Effekt nach ihm benannt wurde, hat schon einige Jahre vor SAGNAC ein Doktorand in Jena, Franz HARRESS, eine Phasenverschiebung in einem rotierenden Interferometer, bestehend aus einem Ring totalreflektierender Glasprismen, beobachtet, und zwar mit offensichtlich größerer Genauigkeit als SAGNAC bei seiner Messung. Allerdings war das Ziel von HARRESS' Dissertation<sup>1</sup> [Harr12] die Messung des Mitführungskoeffizienten des Lichts in Glas und setzte gerade stillschweigend die Abwesenheit des Sagnac-Effektes voraus. Etliche Autoren haben in der Folgezeit die HARRESS'schen Ergebnisse diskutiert bzw. überar-

---

<sup>1</sup>Diese Arbeit wird von etlichen Autoren als „nicht erhältlich“ [Pos67,Tel74] oder gar „verschollen“ [Rod83] bezeichnet. Sie ist in der Tübinger Universitätsbibliothek vorhanden.

beitet [Harz14a, Ein14, Harz14b, Kno20, Lau20, Zer47], oder auch das Experiment mit höherer Genauigkeit wiederholt [Pog26]. Dabei stellte sich heraus, daß in der von HARRESS gewählten Versuchsanordnung eines Ringinterferometers zum Nachweis einer Phasenverschiebung gerade der Dispersionsterm im Mitführungskoeffizienten  $\alpha = \frac{n^2-1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}$  nicht gemessen werden kann. In der Formel für die Phasenverschiebung hebt sich der Brechungsindex  $n$  exakt heraus, so daß HARRESS ironischerweise in seinem Experiment gerade das, was er messen wollte, nicht messen konnte und statt dessen — unwissentlich — sehr wahrscheinlich allein den Sagnac-Effekt beobachtet hat.

„Sagnac-artige“ Überlegungen und Versuche lassen sich jedoch etliche Jahre weiter zurückverfolgen.

Eine erste (von ihm so bezeichnete) relativistische Herleitung des Effektes hat Max von LAUE bereits 1911 [Lau11] gegeben.

MICHELSON hat schon 1897 einen Interferenzversuch mit endlicher eingeschlossener Fläche [Mic1897] durchgeführt<sup>2</sup>; allerdings nicht mit dem eindeutigen Ziel des Nachweises einer Rotation, sondern um das Maß der Mitführung des Äthers durch die Erde bei ihrer Bewegung durch den Weltraum in Abhängigkeit von der Höhe über dem Erdboden zu bestimmen. Das Ergebnis in Hinsicht auf diese Annahme war natürlich negativ, und da während des Versuch weder die eingeschlossene Fläche noch die Orientierung des Interferometers in Bezug zur Erde geändert werden konnte, war diese Versuchsanordnung auch ungeeignet zum Nachweis eines Sagnac-Effektes.

Wiederum MICHELSON war es, der im Jahr 1904 [Mic04] einen detaillierten Vorschlag für einen interferometrischen Nachweis der Erdrotation in Bezug zum Äther gemacht und dabei zum ersten Mal die Formel für die Sagnac-Phasenverschiebung in ihrer üblichen Form (bis auf einen Faktor 2 infolge eines Rechenfehlers) angegeben hat. Einige Autoren (z.B. [Zer47]) haben daher gefordert, daß eigentlich von einem „Michelson-Sagnac-Effekt“ gesprochen werden sollte. Einen Überblick über diese Kontroverse zusammen mit interessanten historischen Angaben gibt HARIHARAN [Hari75]. Die tatsächliche Durchführung des Experiments gelang dann MICHELSON und GALE 1925 [MGP25] in einem Interferometer. Zur Erzielung einer ausreichenden Streifenverschiebung verwendeten sie ein rechteckiges Interferometer ungewöhnlicher Größe, in dem die Lichtstrahlen in insgesamt über zwei Kilometer (!) evakuiertem Metallrohr verliefen.

Den allerersten Vorschlag für einen interferometrischen Nachweis einer Rotation (natürlich im Rahmen der Äther-Theorie) hat jedoch unseres Wissens bereits im Jahre 1893 Oliver LODGE gemacht. Im Rahmen seiner Untersuchungen über die Mitführung des Äthers durch schnell rotierende Massen erwähnt er die Möglichkeit des Nachweises der Erdrotation durch sehr große Interferometer-Anordnungen [Lod1893, p.772f]:

<sup>2</sup>Das ist *nicht* das bekannte MICHELSON-MORLEY-Experiment [MM1887] von 1887; dieses, obzwar auf einem Drehtisch aufgebaut, erfüllt nicht die Bedingung an ein Sagnac-Interferometer ( $A > 0$ ), denn die zwischen den Teilstrahlen eingeschlossene Fläche ist hier gleich Null

“Evidently the larger the square the better, and a large enough square might show even the earth’s rotation effect,…”

Bemerkenswerterweise gibt LODGE dort eine Formel an, die nach kurzer Umformung und Setzen eines „Äther-Mitführungsfaktors“  $k$  gleich 1 (was nichts Anderes als den Übergang von der Äther-Theorie zur Relativitätstheorie bedeutet) genau die Sagnac-Phasenverschiebung ergibt. In einer etwas späteren Arbeit [Lod1897] schlägt er neben diesem Versuch auch die Rotation eines Interferometers auf einem Drehtisch (mitsamt dem Beobachter) vor. Diese Arbeiten scheinen weithin unbekannt<sup>3</sup> geblieben zu sein.

Überhaupt ist der Sagnac-Versuch, angesichts seiner langen Geschichte und seiner grundlegenden Bedeutung, in der Physik bis in die jüngste Zeit hinein erstaunlich unbekannt geblieben. Einen Erklärungsversuch hierfür unternimmt RODLOFF [Rod83]. Nur so ist vielleicht auch zu erklären, daß es bis in die heutige Zeit vorkommen kann, daß der Sagnac-Effekt „wiederentdeckt“ wird [TN88].

In den drei Jahrzehnten nach 1914 wurden einige weitere lichtoptische Sagnac-Experimente durchgeführt, die mit zunehmender Sicherheit die phasenschiebende Wirkung der Rotation — sei es der Erde (s.o. [MGP25]), sei es des Interferometers auf einem Drehtisch [Pog26] — nachwiesen, sowie andere Aspekte, wie die Auswirkung eines Mediums im Strahlengang oder der möglichen Kombinationen des Ruhens oder des Mitrotierens von Lichtquelle, Medium und/oder Detektor untersuchten [DP37,DP42]. Alle diese Experimente waren physikalische Grundlagenversuche und hatten keine praktische Anwendung des Sagnac-Effekts zum Ziel. Eine gute historische Übersicht über die Experimente dieser Zeit gibt z.B. POST in [Pos67].

Zu Beginn der sechziger Jahre führten neue experimentelle Entwicklungen auf zwei verschiedenen Gebieten zu einem verstärkten Wiederaufleben des Interesses am Sagnac-Effekt.

Zum einen ermöglichte es die Erfindung des Lasers, lichtoptische Sagnac-Experimente mit sehr kompakten Geräten und mit bis dahin ungeahnter Präzision durchzuführen. Nach ersten Vorschlägen für Anordnungen mit ringförmigen Lichtbahnen in der Laser-Cavity [Heer59,Heer61,Ros62] wurde der erste sog. ‘Ringlaser’ 1963 von MACEK und DAVIS [MD63] realisiert. Es zeigte sich, daß diese Geräte sich zu einer derartigen Phasennachweisempfindlichkeit weiterentwickeln lassen, daß sie für die Trägheitsnavigation einsetzbar werden, also den Kreiselkompaß als mechanischen Rotationssensor ersetzen können [„SPIE“84,CGPSSS85, Wil87].

Die Entwicklung von Lichtleitfasern mit sehr niedrigen Dämpfungsverlusten erweiterte den möglichen Anwendungsbereich des lichtoptischen Sagnac-Effekts enorm. Durch Aufwickeln einer langen Lichtleitfaser auf eine Spule lassen sich,

<sup>3</sup>Auf seine Veröffentlichung von 1893 habe ich in der gesamten von mir ausgewerteten Literatur zum Sagnac-Effekt keinen einzigen Hinweis gefunden.

bei entsprechend hohen Windungszahlen, Sagnac-Interferometer mit sehr großer eingeschlossener Fläche (und damit großer Empfindlichkeit) bauen. Das prinzipielle Funktionieren dieses sog. 'Faserkreisels' (Fiber Optic Gyroscope, FOG) zeigten VALI und SHORTHILL zum ersten Mal 1976 [VSh76].

Die Ringlaser-Gyroskope haben inzwischen das Stadium der praktischen Anwendbarkeit in der Trägheitsnavigation erreicht, mit einer Nachweisempfindlichkeit für Drehraten<sup>4</sup> von 0.01°/h und weniger [Wil87], und sind daher gerade dabei, die mechanischen Kreiselkompass abzulösen [„SPIE“84], so z.B. in den neuesten Verkehrsflugzeug-Typen [CGPSSS85]. Die Faserkreisel sind von ihrer Empfindlichkeit her noch etwa eine Größenordnung schlechter als die Ringlaser. Man geht jedoch allgemein davon aus, daß sie noch ein erhebliches Potential für eine weitere Erhöhung der Empfindlichkeit besitzen.

In der Literatur finden sich zahlreiche Arbeiten über theoretische wie praktische Aspekte der optischen Gyroskope. Stellvertretend seien hier die Übersichts-Artikel von CULSHAW und GILES [CG83] über die Faserkreisel, von WILKINSON [Wil87] über die Ringlaser-Gyroskope sowie von CHOW *et al.* [CGPSSS85] über sämtliche Typen von lichtoptischen Gyroskopen genannt.

Die andere Entwicklung, die ein neues Interesse am Sagnac-Effekt weckte, war die der **Interferometrie mit Materiewellen** (zunächst vor allem mit Elektronenwellen [MöD55]). Schon 1961 machte daher HEER den Vorschlag eines Sagnac-Experiments mit Materiewellen [Heer61] — ein Artikel, der offensichtlich relativ wenig bekannt wurde, da vor allem in der Neutronen-Interferometrie praktisch immer die Arbeit von PAGE von 1975 [Pag75] als der erste Vorschlag eines Sagnac-Experiments mit Materiewellen zitiert wird.

Ebenso wenig bekannt wurde ein daraufhin von ZIMMERMAN und MERCE-REAU bereits 1965 durchgeführtes Experiment [ZM65], das die Auswirkung einer Rotation auf die **Cooper-Paare** in einem supraleitenden (aus Josephson-Junctions aufgebauten) 'de Broglie-Wellen-Interferometer' nachweist. Allerdings machen es die Autoren dem Leser nicht gerade leicht, in dem Artikel den Zusammenhang mit dem Sagnac-Effekt zu entdecken: Der Titel "Compton Wavelength of Superconducting Electrons" gibt keinerlei Hinweis darauf, und die Autoren nehmen nur ein einziges Mal, und dann auch nur einschränkend, auf den Sagnac-Versuch Bezug:

"This type of experiment is somewhat similar to the Michelson-Sagnac experiments with light. The physical source of the phase shift differs, but the formal expressions are identical."

So nimmt es denn auch nicht Wunder, daß der ansonsten sehr umfassende „klassische“ Übersichtsartikel über den Sagnac-Effekt von POST [Pos67] diese Arbeit nicht zitiert. Die Zusammenhänge scheinen nicht weiter untersucht worden zu sein. Trotz der Bemerkung der Autoren kann man wohl davon ausgehen, daß es

<sup>4</sup>Das entspricht einer Umdrehung in mehr als vier Jahren!

sich um ein Sagnac-Experiment mit Elektronen-Cooperpaaren, also (geladenen) Bosonen, gehandelt hat.

Die Entwicklung der **Neutronen-Interferometrie** führte zum ersten Sagnac-Experiment mit freien Fermionen. Nach Vorschlägen von PAGE [Pag75] und ANANDAN [Ana77] wiesen WERNER, STAUEMANN und COLELLA 1979 [WSC79] mit einem Silizium-Perfektkristall-Interferometer vom Typ, wie ihn BONSE und HART [BH65] für Röntgenstrahlen entwickelt und RAUCH *et al.* [RTB74] erstmals erfolgreich für die Neutronen-Interferometrie eingesetzt hatten, die Wirkung der Erdrotation auf die Neutronenphase nach.

Als etwas „exotischere“ Sagnac-Versuche seien hier noch folgende Vorschläge und Experimente erwähnt:

Vorschläge, ein Josephson-Interferometer mit suprafluidem Helium zu bauen, und damit dann mittels des allgemein-relativistischen Sagnac-Effekts z.B. Gravitationswellen zu messen, wurden von ANANDAN und CHIAO [Ana81a, Ana81b, AC82, Chi82] gemacht.

Es wurden Vorschläge für Sagnac-Experimente mit akustischen sowie magnetostatischen Wellen [NBDS74] in Ferriten [Sta89] gemacht, mit Frequenzen bis in den Mikrowellen-Bereich [Pos79]. Überlegungen zum Sagnac-Effekt mit Phononen werden in [Mar82] angestellt.

Auf den makroskopischen Nachweis des Sagnac-Effekts bei eingeschlossenen Flächen von der Größenordnung des Erdquerschnitts durch die direkte Messung der dem Sagnac-Effekt zugrundeliegenden relativistischen Zeitdilatation mittels elektromagnetischer (Zeit-) Signale von Atomuhr-bestückten Satelliten [SYH76, AWA85] sowie mittels um die Erde geflogener Atomuhren [Haf72, HK72a] geht Abschnitt 2.4 näher ein.

Vorschläge für ein (im Prinzip) ultra-empfindliches Sagnac-Interferometer mit schweren neutralen Atomen macht CLAUSER [Cla88].

Von einem grundlegenden Standpunkt aus betrachtet ist also eine der wesentlichen noch ungeschlossenen experimentellen Lücken der Sagnac-Effekt mit **geladenen freien Fermionen**. Naheliegenderweise kommen hierfür bei dem heutigen Stand der experimentellen Technik nur **Elektronen** in Frage. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, ein Sagnac-Interferometer für Elektronenwellen aufzubauen und damit ein elektronenoptisches Sagnac-Experiment zu versuchen.

