

## Werk

**Jahr:** 1957

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 Z NAT 2148:23

**Digitalisiert:** Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

**Werk Id:** PPN101433392X\_0023

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X\\_0023](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0023)

**LOG Id:** LOG\_0011

**LOG Titel:** Über die bisherigen Erfahrungen und Meßergebnisse mit dem Seegravimeter

**LOG Typ:** article

## Übergeordnetes Werk

**Werk Id:** PPN101433392X

**PURL:** <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

**OPAC:** <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

## Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

## Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen  
Georg-August-Universität Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen  
Germany  
Email: [gdz@sub.uni-goettingen.de](mailto:gdz@sub.uni-goettingen.de)

## Über die bisherigen Erfahrungen und Meßergebnisse mit dem Seegravimeter

Von A. Graf, Lochham <sup>1)</sup>

**Zusammenfassung:** Es wird über die Meßergebnisse von zwei Seegravimeter-Meßfahrten auf dem Starnberger See an Bord der 100-Tonnen großen "Tutzing" und einer Mittelmeer-Meßfahrt an Bord der 5000-Tonnen großen "Messapia" berichtet. Bei der einen Starnberger See-Meßreise legte das Schiff die 4,4 km lange Nord-Südstrecke Starnberg-Leoni fünfmal in beiden Richtungen, bei der anderen die 14,6 km lange Strecke Seehafen-Starnberg-Bernried dreimal mit Kurs 16,5° und viermal mit Kurs 196,5° zurück. Bei der erstgenannten Meßreihe herrschte windstilles Wetter, bei der zweiten starke Gewittertätigkeit mit böigen Winden. Als Reproduzierbarkeit bzw. Genauigkeit einer Einzelmessung wurde ermittelt  $\pm 0,3$  mGal bei der Schönwetterfahrt und  $\pm 0,8$  mGal bei der Schlechtwetterfahrt. Die Mittelmeerreise erstreckte sich auf die Route Venedig-Triest und zurück. Bei der Hinfahrt herrschte Sturm mit 80 km/Std. Windgeschwindigkeit und daher war nur ein kurzes Stück der Meßkurve auswertbar. Bei der Rückfahrt war die See ruhig und glatt. Ein Teil der erhaltenen Schwerewerte konnte mit den Unterwasser-Gravimetermessungen C. Morrellis verglichen werden. Die Übereinstimmung betrug im Mittel etwa  $\pm 2$  mGal, trotzdem der Browneffekt nicht berücksichtigt werden konnte.

**Abstract:** The author reported about the results of two measuring trips on the lake "Starnberg" on board of the 100-ton ship "Tutzing" and a measuring trip on the Mediterranean on board of the 5000 ton-ship "Messapia". At the lake Starnberg it has been found an accuracy of  $\pm 0,3$  mgl under good weather conditions and of  $\pm 0,8$  mgl on a bad weather day. The accuracy of the values in the Adriatic sea compared with the underwater measurements of Morelli was  $\pm 2$  mgl without taking in account the Browneffekt, which could not be determined.

In einer früheren Arbeit [2] war über die ersten Messungen mit dem neuentwickelten Seegravimeter [1] auf dem Starnberger See berichtet worden. Seitdem wurden drei weitere ganztägige Meßfahrten auf dem nur 100 Tonnen fassenden Motorschiff "Tutzing" und eine Mittelmeerfahrt auf dem 5000 t großen Dampfer "Messapia" von Venedig nach Triest und zurück durchgeführt.

Über die erzielten Meßergebnisse und die gemachten Erfahrungen wird nachstehend berichtet.

<sup>1)</sup> Dr. Ing. habil. A. Graf, Lochham b. München, Liebigstr. 4

Um die Genauigkeit eines Seegravimeters zu prüfen, ist es zunächst notwendig, jene Fehlermöglichkeiten, die mit dem Gerät nichts zu tun haben, abzutrennen von jenen, die im Gerät selbst liegen. Zu den ersteren gehören: ungenaue Lagebestimmung des Schiffes, Fehler in der Angabe der Schiffsgeschwindigkeit und des Kurses sowie Vernachlässigung der Brownekorrektion, zu den letzteren: ungenügende Linearität der Anzeige, zu geringe Dämpfung, Fehler der elektrischen Zwischenglieder wie elektrischer Abgriff, Verstärker, Schreiber usw., Einflüsse von Spannungs- und Frequenzschwankungen und alle jene Fehler, die auch bei Landmessungen in Erscheinung treten können, nämlich nicht genügende Reproduzierbarkeit, Arretierverzerrungen, Sprünge, nicht kompensierte Druck- und Temperatureffekte etc.

Aus Gründen dieser Fehlertrennung ist bei den bereits veröffentlichten Messungen vom 19. 11. 55 auf der "Seeshaupt" die Meßanordnung so getroffen worden, daß die Meßwerte bei ruhendem und unverankertem Schiff in unmittelbarer Nähe des Landesteges mit jenen verglichen wurden, die auf dem Landesteg mit einem Landgravimeter erhalten worden waren. Es fielen in diesem Falle also nahezu alle Fehler der ersteren Art weg. Ganz war dies allerdings nicht der Fall. Denn es ist nicht möglich, ein Schiff völlig ruhig im Wasser zu halten, es wird immer etwas driften. Bei diesen Messungen war eine Genauigkeit von  $\pm 0,5$  mGal für eine Einzelbeobachtung erzielt worden.

Bei den nun zu diskutierenden Messungen v. 27.4.56 und 11.5.56 wurde Wert darauf gelegt zu erfahren, welche Genauigkeit mit dem Seegravimeter auf einem Binnensee *während der Fahrt* zu erreichen ist.

Bei der Fahrt am 27.4.56 wurde, um den Eötvöseffekt auszuschalten, ein reines Nord-Südprofil ausgewählt, nämlich die Strecke Starnberg-Leoni und diese 5 mal mit der konstanten Geschwindigkeit von 19,5 km/Stunde hin und zurück durchfahren. Die Ortsbestimmung erfolgte aus Uhrzeit und Geschwindigkeit. Diese Methode setzt Windstille und Driftfreiheit voraus. Solche Verhältnisse waren am 27.4.56 gegeben. Das Messprofil war 4,4 km lang, der Untergrund unter der Wasseroberfläche ist stark profiliert und sinkt bis 80 m Tiefe ab. Leider war der Kompaß des Schiffes nicht genügend kompensiert, so daß der Steuermann den Kurs abschätzen mußte, um ohne Kursänderung ans Ziel zu kommen, d.h. in der Nord-Süd-Richtung zu bleiben. Bei der Fahrtrichtung Nord-Süd (Starnberg-Leoni) glückte dies bereits bei der ersten Fahrt, so daß alle 5 Fahrten unter sich vergleichbar sind. Bei der Rückfahrt Leoni-Starnberg dagegen wurde zunächst der Kurs  $207^\circ$  eingestellt. Dabei wurde der Landesteg Starnberg zu weit östlich erreicht und daher bei der zweiten Fahrt  $206,5^\circ$  anvisiert. Auch dieser Wert erwies sich noch zu hoch. Erst der Kurs  $206^\circ$  stimmte genau mit der Richtung zum Landesteg Starnberg (geografisch Nord) überein. Die beiden ersten Reihen in Tabelle 1 mußten daher mit einer kleinen Eötvös-

korrektur versehen werden, um mit den übrigen, die genauen Nord-Süd-Kurs besitzen, verglichen werden zu können. Da wegen der starken Änderung des Bodenprofils die Eötvöskorrektion allein nicht ausreichend ist, sondern noch durch eine topografische ergänzt werden müßte, wurden von den 10 Meßreihen zur Fehlerberechnung die beiden ersten nicht herangezogen. Die Tabellen 1 und 2 enthalten die direkten minütlichen Ablesungen des Registrierstreifens, sowie die Mittelwerte und die Fehlerquadratsummen. Für beide Richtungen errechnet sich ein mittlerer Fehler für die Einzelmessung von  $\pm 0,27$  mGal. Zu dem gleichen Ergebnis gelangt man, wenn

Tabelle 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zeit	Ablg. pars	Zeit	Ablg. pars	Zeit	Ablg. pars	Zeit	Ablg. pars	Zeit	Ablg. pars	Mittel pars	$\Sigma \delta^2 / 2$
10 <sup>02</sup>	28,0	11 <sup>18</sup>	27,5	12 <sup>49</sup>	28,0	14 <sup>11</sup>	28,3	15 <sup>24</sup>	--	28,2	0,01
10 <sup>01</sup>	27,7	11 <sup>17</sup>	27,0	12 <sup>48</sup>	27,5	14 <sup>10</sup>	27,6	15 <sup>23</sup>	27,4	27,5	0,01
10 <sup>00</sup>	27,7	11 <sup>16</sup>	26,9	12 <sup>47</sup>	27,0	14 <sup>09</sup>	27,0	15 <sup>22</sup>	27,2	27,1	0,02
9 <sup>59</sup>	27,9	11 <sup>15</sup>	27,4	12 <sup>46</sup>	27,5	14 <sup>08</sup>	27,5	15 <sup>21</sup>	27,4	27,5	0,01
9 <sup>58</sup>	28,2	11 <sup>14</sup>	27,8	12 <sup>45</sup>	28,2	14 <sup>07</sup>	28,7	15 <sup>20</sup>	28,1	28,3	0,10
9 <sup>57</sup>	28,7	11 <sup>13</sup>	28,7	12 <sup>44</sup>	29,0	14 <sup>06</sup>	29,8	15 <sup>19</sup>	29,0	29,3	0,22
9 <sup>56</sup>	29,4	11 <sup>12</sup>	29,5	12 <sup>43</sup>	30,1	14 <sup>05</sup>	31,0	15 <sup>18</sup>	30,0	30,4	0,31
9 <sup>55</sup>	30,6	11 <sup>11</sup>	30,5	12 <sup>42</sup>	31,2	14 <sup>04</sup>	31,8	15 <sup>17</sup>	31,0	31,3	0,18
9 <sup>54</sup>	31,1	11 <sup>10</sup>	31,3	12 <sup>41</sup>	32,5	14 <sup>03</sup>	32,4	15 <sup>16</sup>	32,0	32,3	0,07
	Kurs-abw.		Kurs-abw.		Mittl. Fehler: $\pm 0,10 = 0,316$ pars = $\pm 0,27$ mGal						

Tabelle 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zeit	Ablg. pars	Zeit	Ablg. pars	Zeit	Ablg. pars	Zeit	Ablg. pars	Zeit	Ablg. pars	Mittel pars	$\frac{\Sigma \delta^2}{4}$
10 <sup>38</sup>	33,2	11 <sup>55</sup>	33,6	13 <sup>29</sup>	33,1	14 <sup>46</sup>	33,5	16 <sup>14</sup>	33,0	33,3	0,09
10 <sup>37</sup>	32,5	11 <sup>54</sup>	33,0	13 <sup>28</sup>	32,8	14 <sup>45</sup>	32,4	16 <sup>13</sup>	32,4	32,6	0,07
10 <sup>36</sup>	31,6	11 <sup>53</sup>	31,5	13 <sup>27</sup>	31,8	14 <sup>44</sup>	32,2	16 <sup>12</sup>	31,8	31,8	0,07
10 <sup>35</sup>	30,8	11 <sup>52</sup>	30,7	13 <sup>26</sup>	30,8	14 <sup>43</sup>	31,8	16 <sup>11</sup>	30,8	31,0	0,21
10 <sup>34</sup>	29,8	11 <sup>51</sup>	29,7	13 <sup>25</sup>	29,9	14 <sup>42</sup>	30,9	16 <sup>10</sup>	30,0	30,1	0,23
10 <sup>33</sup>	28,9	11 <sup>50</sup>	29,0	13 <sup>24</sup>	28,8	14 <sup>41</sup>	28,9	16 <sup>09</sup>	28,6	28,8	0,03
10 <sup>32</sup>	28,0	11 <sup>49</sup>	28,3	13 <sup>23</sup>	28,0	14 <sup>40</sup>	27,9	16 <sup>08</sup>	28,2	28,1	0,03
10 <sup>31</sup>	27,1	11 <sup>48</sup>	28,0	13 <sup>22</sup>	28,0	14 <sup>39</sup>	27,7	16 <sup>07</sup>	27,6	27,7	0,14
10 <sup>30</sup>	27,0	11 <sup>47</sup>	27,3	13 <sup>21</sup>	27,5	14 <sup>38</sup>	27,0	16 <sup>06</sup>	27,1	27,2	0,05
	Mittlerer Fehler: $\pm 0,10 = 0,316$ pars = $\pm 0,27$ mGal										

man die zusammengehörenden Werte unmittelbar vor dem Abbremsen und nach der Anfahrtsbeschleunigung des Schiffes aufträgt, wie dies in Abb. 2 geschehen ist, und die Abweichungen vom Mittelwert bildet. Hierbei zeigt sich, daß die Differenz in Richtung Nord (6,1 pars) von jener in Richtung Süd (4,1 pars) verschieden ist. Dies beruht darauf, daß sich die beiden Differenzen nicht auf das gleiche Wegstück beziehen. Beim Anfahren muß mit dem Ablesen solange gewartet werden, bis die Schiffsgeschwindigkeit konstant ist. Dies ist erst nach etwa 1,1 km Fahrt der Fall, so daß die erste Ablesung erst bei Punkt a in Abb. 1 erfolgen kann. Nach 8 Minuten Fahrzeit ist Punkt b erreicht (2,8 km), von wo ab bereits wieder das Schiff verzögert werden muß. Auf der Rückfahrt fällt nun b' nicht mit b zusammen, da sich in b das Schiff noch in der Anfahrtsbeschleunigung befindet. Das Tiefenprofil in Abb. 4 zeigt, daß unter der Strecke a-b die Höhenlinien von 535 m auf 500 m absinken und dann wieder auf 550 m ansteigen, während sie unter der Strecke a'-b' fast gleichmäßig von 500 m auf 580 m zunehmen. Dies kommt noch besser zum Ausdruck, wenn man nunmehr die Mittelwerte in Tabelle 1 und 2 aufträgt (Abb. 3). Es zeigt sich hierbei, daß sich Hin- und Rückprofil gut zur Deckung bringen lassen, wenn man Anfang und Ende der Meßstrecken (a-b bzw. a'-b') jeweils 1100 m bzw. 500 m vom Ziel entfernt annimmt, was sich auch zwanglos aus der bekannten Schiffsgeschwindigkeit errechnen läßt.

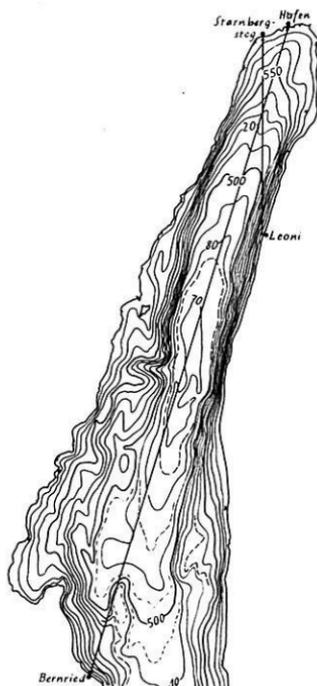


Abb. 1: Skizze des Starnberger Sees mit den beiden Meßprofilen.

In Abb. 4 ist ferner die Bouguerkorrektion eingetragen, die der Wassertiefe proportional ist. Addiert man diese zu den Meßwerten gemäß Abb. 5, so erkennt man, daß die Schwereabnahme von Starnberg nach Leoni fast linear verläuft, also keine lokale Anomalie, die durch das Untergrundrelief bedingt sein könnte, aufweist. Dagegen ist ersichtlich, daß eine zu den Alpen hin ansteigende negative regionale Schwerestörung von 4,3 mGal vorhanden ist, da der Breiteneffekt von der Gesamtdifferenz von 7,8 mGal nur etwa 3,5 mGal ausmacht.

Die hier angenommene Zuordnung der Meßwerte bei der Hin- und Rück-

fahrt und ihre gute Übereinstimmung mit dem aus dem Bodenrelief sich ergebenden Bouguerkorrekturen beweist, daß die errechnete Genauigkeit von  $\pm 0,3$  mGal für die Einzelmessung reell ist. Dieser Betrag stellt aber noch

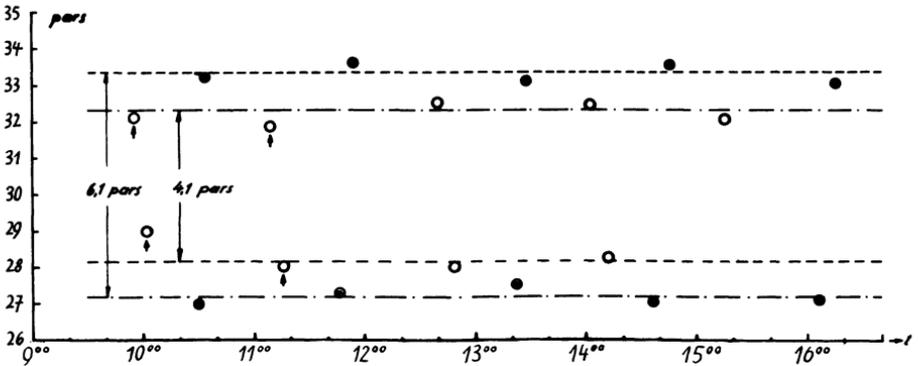


Abb. 2: Die Anfangs- und Endschwerewerte des Meßprofils Starnberg-Leoni bei voller Fahrt des Schiffes (c. 19 km/Std.). Werte in 500 m bzw. 1100 m vom Landesteg bei ca. 20 km/Std. Schiffsgeschwindigkeit. ● Werte am Meßpunkt a und b; ○ Werte am Meßpunkt a' und b' gemäß Abb. 1; ◐ Werte mit Kurskorrektur versehen.

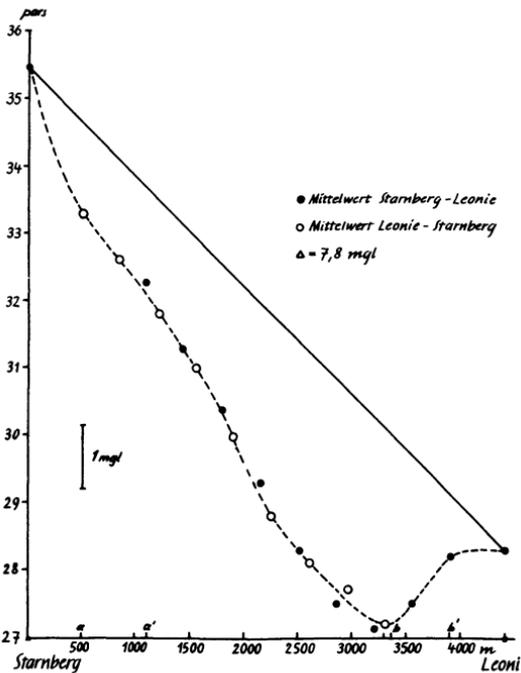


Abb. 3: Gemittelte Schwerewerte des Meßprofils Starnberg-Leoni bei 5-facher Wiederholung.

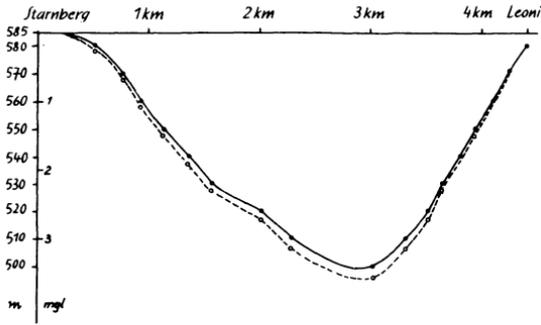


Abb. 4: Tiefenprofil längs der Fahrtroute Starnberg-Leoni und entsprechende Bouguerwerte.

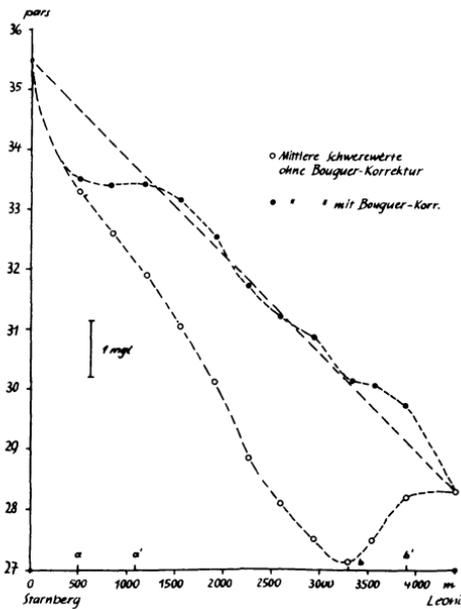


Abb. 5: Nach Bouguer reduzierte mittlere Schwerewerte längs des Meßprofiles Starnberg-Leoni.

nicht die untere Grenze dar. Sicherlich hätte sich die Genauigkeit noch etwas steigern lassen, wenn die Fahrtgeschwindigkeit kleiner gewesen und am Kurs noch genauer und starrer festgehalten worden wäre. Schon kleine Kursabweichungen machen sich bei der Messung bemerkbar. Sie ergeben nicht nur einen Eötvöseffekt, sondern möglicherweise auch eine Geschwindigkeitsänderung und damit einen Browneffekt. Ein Schiff, das um einen gegebenen Kurs leicht hin und her pendelt, braucht bei gleicher Tourenzahl der Schrauben länger für eine bestimmte Fahrstrecke als ein Schiff, das den Kurs starr einhält. Die erwähnten Fehlermöglichkeiten sind der Schiffsgeschwindigkeit proportional, gehen also mit ihrer Verringerung entsprechend zurück.

Nachdem nunmehr die Genauigkeit des Seegravimeters bei konstantem Nord-Süd-Kurs ermittelt war, wurde am 11.5.56 eine weitere Meßfahrt mit einer von Nord-Süd abweichenden Fahrtrichtung unternommen und zu diesem Zwecke die Strecke Hafen-Starnberg-Bernried (14,6 km) gewählt. Es traf sich günstig, daß dieses Mal das Wetter schlechter war als bei den früheren Messungen. So konnten auch Erfahrungen bei nicht ganz ruhiger See gewonnen werden. Der Tag war regnerisch, es herrschte teilweise böiger Wind und das Schiff durchkreuzte mehrmals in Seemitte eine Gewitterfront. Die Wellen zeigten Schaumkämme.

Die Abb. 6 enthält wieder die direkten Ablesungen von den Registrierstreifen. Am auffälligsten ist die Punktfolge zwischen 12<sup>04</sup> und 12<sup>24</sup> in

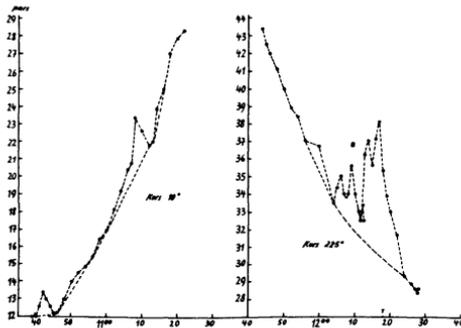


Abb. 6: Schwerregistrierung längs des Profils Hafen-Starnberg-Bernried bei voller Fahrt des Schiffes und unruhiger See.

Abb. 6, wo starkes Gewitter herrschte und ein nicht unbeträchtlicher Seegang. Die Schwankungen des Schiffes waren stark spürbar, wenn auch von einem Sturm nicht gesprochen werden kann. Leider stand mir kein brauchbarer Horizontalbeschleunigungsmesser zur Verfügung, so daß der Browneffekt nicht berechnet werden konnte. Letzterer betrug etwa 11 mGal maximal. Um 11<sup>36</sup> kreuzte die "Bayern" den Kurs der "Tutzing". Die erzeug-

ten Wellen brachten das Schiff in eine Schaukelbewegung um die Längsachse und erzeugten einen Browneffekt von mehreren mGal.

Um die einzelnen Meßprofile miteinander vergleichen zu können, muß hier zunächst der Eötvöseffekt berechnet werden. Er betrug in Fahrtrichtung Bernried 14,63 mGal = 9,5 pars und in entgegengesetzter Richtung mit etwas Gegenwind 13,85 mGal = 9,0 pars. Hieraus errechnet sich ein Eichwert von 1,54 mGal pro pars, was mit früheren Skalenwertbestimmungen gut übereinstimmt. Zieht man von allen Profilen Hafen-Bernried 9,5 pars ab und addiert man zu allen Profilen Bernried-Hafen 9,0 pars, so ergeben sich die Zahlenwerte in Tabelle 3 und 4. Bildet man wieder die Mittel-

Tabelle 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zeit	pars	Zeit	pars	Zeit	pars	Mittel	$\frac{\sum \delta^2}{2}$	$\sqrt{\frac{\sum \delta^2}{2}}$
11 <sup>44</sup>	34,9	14 <sup>00</sup>	34,5	16 <sup>14</sup>	35,5	35,0	0,25	0,50
11 <sup>46</sup>	33,5	14 <sup>02</sup>	33,0	16 <sup>16</sup>	35,0	33,8	1,03	1,02
11 <sup>48</sup>	32,1	14 <sup>04</sup>	32,5	16 <sup>18</sup>	33,5	32,7	0,52	0,72
11 <sup>50</sup>	32,0	14 <sup>06</sup>	31,2	16 <sup>20</sup>	32,3	31,8	0,33	0,58
11 <sup>52</sup>	30,4	14 <sup>08</sup>	29,9	16 <sup>22</sup>	31,6	30,6	0,76	0,87
11 <sup>54</sup>	30,7	14 <sup>10</sup>	29,5	16 <sup>24</sup>	30,5	30,2	0,21	0,46
11 <sup>56</sup>	28,5	14 <sup>12</sup>	28,5	16 <sup>26</sup>	30,0	29,0	1,00	1,00
11 <sup>58</sup>	28,3	14 <sup>14</sup>	27,3	16 <sup>28</sup>	29,7	28,4	1,45	1,20
12 <sup>00</sup>	28,2	14 <sup>16</sup>	26,6	16 <sup>30</sup>	29,4	28,0	1,98	1,40
12 <sup>02</sup>	26,6	14 <sup>18</sup>	24,8	16 <sup>32</sup>	28,5	26,6	3,42	1,85
12 <sup>04</sup>	25,0	14 <sup>20</sup>	25,5	16 <sup>34</sup>	27,5	26,0	1,75	1,36
12 <sup>06</sup>	26,5	14 <sup>22</sup>	23,8	16 <sup>36</sup>	26,7	25,6	2,63	1,62
12 <sup>08</sup>	25,5	14 <sup>24</sup>	22,7	16 <sup>38</sup>	26,5	24,9	3,89	1,97
12 <sup>10</sup>	25,5	14 <sup>26</sup>	24,2	16 <sup>40</sup>	26,4	25,3	1,25	1,12
12 <sup>12</sup>	24,9	14 <sup>28</sup>	22,3	16 <sup>42</sup>	24,7	23,9	2,10	1,45
12 <sup>14</sup>	28,5	14 <sup>30</sup>	22,0	16 <sup>44</sup>	24,3	24,9	10,86	3,30
12 <sup>16</sup>	28,6	14 <sup>32</sup>	21,6	16 <sup>46</sup>	24,3	24,8	12,45	3,63
12 <sup>18</sup>	26,8	14 <sup>34</sup>	21,3	16 <sup>48</sup>	23,5	23,8	7,67	2,77
12 <sup>20</sup>	24,5	14 <sup>36</sup>	20,7	16 <sup>50</sup>	22,3	22,5	3,64	1,91
12 <sup>22</sup>	23,2	14 <sup>38</sup>	20,9	16 <sup>52</sup>	22,5	22,2	1,39	1,18
12 <sup>24</sup>	20,8	14 <sup>40</sup>	20,3	16 <sup>54</sup>	22,2	21,1	0,55	0,74
12 <sup>26</sup>	20,4	14 <sup>42</sup>	20,5	16 <sup>56</sup>	22,0	21,0	0,21	0,46

mit

Gang-  
korrekt.Mittlerer Fehler =  $31,10 : 22 = 1,415 \text{ pars} = \pm 2,2 \text{ mGal}$ 

werte und die Abweichungen von diesen, so ergibt Tabelle 3 ohne Rücksichtnahme auf Gang und die vom Unwetter verursachten Abweichungen einen mittleren Fehler von  $\pm 2,2 \text{ mGal}$  und Tabelle 4 einen solchen von  $\pm 1,2 \text{ mGal}$ . Die Mittelwerte sind in Abb. 7 aufgetragen. Eine solche Auswertung ist aber zu summarisch und verschlechtert das Meßergebnis. Denn

Tabelle 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Zeit	pars	Zeit	pars	Zeit	pars	Zeit	pars	Mittel pars	$\frac{\Sigma \delta^2}{3}$	$\sqrt{\frac{\Sigma \delta^2}{3}}$
10 <sup>40</sup>	21,0	12 <sup>52</sup>	21,1	15 <sup>07</sup>	21,7	17 <sup>14</sup>	22,0	21,4	0,23	0,48
10 <sup>42</sup>	22,4	12 <sup>54</sup>	21,5	15 <sup>09</sup>	22,0	17 <sup>16</sup>	21,7	21,9	0,17	0,41
10 <sup>44</sup>	21,6	12 <sup>56</sup>	21,0	15 <sup>11</sup>	22,2	17 <sup>18</sup>	21,7	21,6	0,24	0,49
10 <sup>46</sup>	21,2	12 <sup>58</sup>	21,3	15 <sup>13</sup>	22,0	17 <sup>20</sup>	23,0	21,9	0,69	0,83
10 <sup>48</sup>	22,0	13 <sup>00</sup>	22,2	15 <sup>15</sup>	22,3	17 <sup>22</sup>	23,5	22,5	0,70	0,84
10 <sup>50</sup>	23,0	13 <sup>02</sup>	22,9	15 <sup>17</sup>	23,7	17 <sup>24</sup>	25,5	23,8	1,45	1,20
10 <sup>52</sup>	23,5	13 <sup>04</sup>	23,0	15 <sup>19</sup>	24,7	17 <sup>26</sup>	25,5	24,2	1,29	1,13
10 <sup>54</sup>	23,9	13 <sup>06</sup>	24,2	15 <sup>21</sup>	24,7	17 <sup>28</sup>	26,0	24,7	0,86	0,93
10 <sup>56</sup>	24,5	13 <sup>08</sup>	24,2	15 <sup>23</sup>	25,0	17 <sup>30</sup>	25,4	24,8	0,28	0,53
10 <sup>58</sup>	25,5	13 <sup>10</sup>	24,6	15 <sup>25</sup>	25,6	17 <sup>32</sup>	26,2	25,5	0,44	0,66
11 <sup>00</sup>	26,0	13 <sup>12</sup>	25,3	15 <sup>27</sup>	26,9	17 <sup>34</sup>	27,2	26,5	0,81	0,90
11 <sup>02</sup>	27,2	13 <sup>14</sup>	26,4	15 <sup>29</sup>	28,0	17 <sup>36</sup>	28,0	27,6	0,64	0,80
11 <sup>04</sup>	28,2	13 <sup>16</sup>	27,0	15 <sup>31</sup>	28,6	17 <sup>38</sup>	29,5	28,3	1,08	1,04
11 <sup>06</sup>	29,4	13 <sup>18</sup>	28,4	15 <sup>33</sup>	29,1	17 <sup>40</sup>	31,0	29,5	1,20	1,10
11 <sup>08</sup>	32,4	13 <sup>20</sup>	29,3	15 <sup>35</sup>	29,8	17 <sup>42</sup>	31,1	30,6	1,94	1,39
11 <sup>10</sup>	31,6	13 <sup>22</sup>	30,9	15 <sup>37</sup>	30,5	17 <sup>44</sup>	32,0	31,2	0,46	0,68
11 <sup>12</sup>	30,8	13 <sup>24</sup>	31,8	15 <sup>39</sup>	31,3	17 <sup>46</sup>	33,0	31,5	0,96	0,98
11 <sup>14</sup>	32,9	13 <sup>26</sup>	33,0	15 <sup>41</sup>	32,3	17 <sup>48</sup>	34,1	33,1	0,56	0,75
11 <sup>16</sup>	34,0	13 <sup>28</sup>	34,0	15 <sup>43</sup>	33,8	17 <sup>50</sup>	35,0	34,2	0,29	0,54
11 <sup>18</sup>	36,0	13 <sup>30</sup>	35,7	15 <sup>45</sup>	34,8	17 <sup>52</sup>	36,0	35,6	0,32	0,56
11 <sup>20</sup>	36,9	13 <sup>32</sup>	36,4	15 <sup>47</sup>	36,3	17 <sup>54</sup>	37,8	36,8	0,47	0,68
11 <sup>22</sup>	38,3	13 <sup>34</sup>	37,7	15 <sup>49</sup>	37,8	17 <sup>56</sup>	--	37,9	0,10	0,32

Mittlerer Fehler:  $17,24 : 22 = 0,785 \text{ pars} = \pm 1,2 \text{ mGal}$

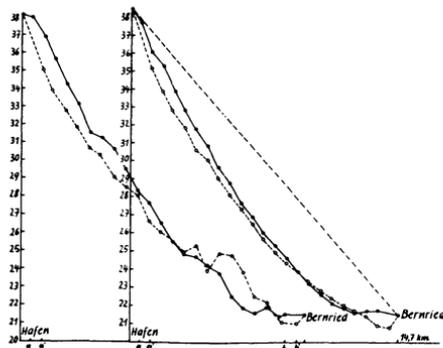


Abb. 7: Mittelwerte bei drei-vierfacher Wiederholung ohne Rücksicht auf Gang und windbedingte Browne-Effekte (links). Mittelwerte bei drei-vierfacher Wiederholung mit Gangkorrektur und roher Eliminierung des Browne-Effektes (rechts).

die Abb. 6 lässt deutlich erkennen, daß die plötzlichen Abweichungen keine Untergrundanomalien, sondern durch die Schwankungen des Schiffes bedingte Browneffekte sind. Letztere sind aber immer positiv und es ist daher keine Willkür, wenn man sie in der Weise näherungsweise eliminiert, daß man stets die tiefsten Meßwerte miteinander verbindet bzw. interpoliert, wie dies in Abb. 6 angedeutet ist. Die auf diese Weise neuermittelten Werte sind in den Tabellen 5 und 6 eingetragen und vom Gravimetergang befreit worden. Abb. 7 zeigt rechts die neuen Mittelwerte. Ein Vergleich mit den früheren (links) läßt erkennen, daß dieses Verfahren berechtigt ist und zu bedeutend besseren Ergebnissen führt. Der mittlere Fehler geht bei dieser Auswertemethode für beide Profile von  $\pm 2,2$  mGal bzw.  $\pm 1,2$  mGal auf  $\pm 0,77$  bzw.  $\pm 0,75$  mGal zurück. Daß die beiden Profile am Anfang etwas divergieren, liegt nicht an der Messung, sondern an der nicht völligen Konstanz der Schiffsgeschwindigkeit infolge von Windböen bzw. von Drehungen der Windrichtung. Die Mittelwerte aus den Hin- und

Tabelle 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Zeit	pars	Zeit	pars	Zeit	pars	Zeile 2 m. Gang- korrekt.	Zeile 4 m. Gang- korrekt.	Mittel Zeile 6, 7,8 pars	$\frac{\sum \delta^2}{2}$	$\sqrt{\frac{\sum \delta^2}{2}}$
11 <sup>44</sup>	33,9	14 <sup>00</sup>	34,5	16 <sup>16</sup>	35,0	35,4	35,0	35,1	0,06	0,24
11 <sup>46</sup>	33,0	14 <sup>02</sup>	33,0	16 <sup>18</sup>	33,5	34,5	33,5	33,8	0,34	0,58
11 <sup>48</sup>	31,6	14 <sup>04</sup>	32,5	16 <sup>20</sup>	32,3	33,1	33,0	32,8	0,19	0,44
11 <sup>50</sup>	30,5	14 <sup>06</sup>	31,2	16 <sup>22</sup>	31,6	32,0	31,7	31,8	0,05	0,22
11 <sup>52</sup>	29,5	14 <sup>08</sup>	29,9	16 <sup>24</sup>	30,5	31,0	30,4	30,6	0,11	0,33
11 <sup>54</sup>	28,9	14 <sup>10</sup>	29,5	16 <sup>26</sup>	29,8	30,4	30,0	30,1	0,10	0,32
11 <sup>56</sup>	27,5	14 <sup>12</sup>	28,5	16 <sup>28</sup>	29,0	29,0	29,0	29,0	0,00	0,00
11 <sup>58</sup>	26,5	14 <sup>14</sup>	27,3	16 <sup>30</sup>	28,4	28,0	27,8	28,1	0,10	0,32
12 <sup>00</sup>	25,5	14 <sup>16</sup>	26,6	16 <sup>32</sup>	27,8	27,0	27,1	27,3	0,19	0,44
12 <sup>02</sup>	24,7	14 <sup>18</sup>	25,7	16 <sup>34</sup>	27,1	26,2	26,2	26,5	0,27	0,52
12 <sup>04</sup>	24,0	14 <sup>20</sup>	24,5	16 <sup>36</sup>	26,5	25,5	25,0	25,7	0,59	0,77
12 <sup>06</sup>	23,3	14 <sup>22</sup>	23,5	16 <sup>38</sup>	25,8	24,8	24,0	24,9	0,81	0,90
12 <sup>08</sup>	22,8	14 <sup>24</sup>	22,8	16 <sup>40</sup>	25,2	24,3	23,3	24,3	0,90	0,95
12 <sup>10</sup>	22,3	14 <sup>26</sup>	22,3	16 <sup>42</sup>	24,7	23,8	22,8	23,8	0,90	0,95
12 <sup>12</sup>	21,9	14 <sup>28</sup>	21,9	16 <sup>44</sup>	24,0	23,4	22,4	23,3	0,70	0,84
12 <sup>14</sup>	21,5	14 <sup>30</sup>	21,7	16 <sup>46</sup>	23,3	23,0	22,2	22,8	0,30	0,58
12 <sup>16</sup>	21,0	14 <sup>32</sup>	21,3	16 <sup>48</sup>	22,8	22,5	21,8	22,4	0,27	0,52
12 <sup>18</sup>	20,7	14 <sup>34</sup>	21,0	16 <sup>50</sup>	22,3	22,2	21,5	22,0	0,29	0,54
12 <sup>20</sup>	20,3	14 <sup>36</sup>	20,7	16 <sup>52</sup>	22,0	21,8	21,2	21,7	0,18	0,42
12 <sup>22</sup>	20,0	14 <sup>38</sup>	20,4	16 <sup>54</sup>	21,9	21,5	20,9	21,4	0,25	0,50
12 <sup>24</sup>	19,7	14 <sup>40</sup>	20,2	16 <sup>56</sup>	20,7	21,2	20,7	20,9	0,09	0,30
12 <sup>26</sup>	19,4	14 <sup>42</sup>	20,5	16 <sup>58</sup>	20,4	20,9	21,0	20,8	0,11	0,33

Mittlerer Fehler: 0,50 pars =  $\pm$  0,77 mGal

Tabelle 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zeit	pars	Zeit	pars	Zeit	pars	Zeile 2 m. Gang- korrekt.	Mittel zeile 4,6,7	$\frac{\sum \delta^2}{2}$	$\sqrt{\frac{\sum \delta^2}{2}}$
12 <sup>52</sup>	21,0	15 <sup>06</sup>	21,8	17 <sup>12</sup>	22,0	21,7	21,8	0,03	0,17
12 <sup>54</sup>	21,0	15 <sup>08</sup>	21,7	17 <sup>14</sup>	21,7	21,7	21,7	0,00	0,00
12 <sup>56</sup>	21,0	15 <sup>10</sup>	21,7	17 <sup>16</sup>	21,4	21,7	21,6	0,03	0,17
12 <sup>58</sup>	21,3	15 <sup>12</sup>	21,8	17 <sup>18</sup>	21,7	22,0	21,8	0,03	0,17
13 <sup>00</sup>	21,5	15 <sup>14</sup>	22,1	17 <sup>20</sup>	22,1	22,2	22,1	0,01	0,10
13 <sup>02</sup>	22,0	15 <sup>16</sup>	22,6	17 <sup>22</sup>	22,6	22,7	22,6	0,01	0,10
13 <sup>04</sup>	22,5	15 <sup>18</sup>	23,1	17 <sup>24</sup>	23,2	23,2	23,2	0,01	0,10
13 <sup>06</sup>	23,2	15 <sup>20</sup>	23,7	17 <sup>26</sup>	23,8	23,9	23,8	0,01	0,10
13 <sup>08</sup>	23,9	15 <sup>22</sup>	24,5	17 <sup>28</sup>	24,7	24,6	24,6	0,01	0,10
13 <sup>10</sup>	24,6	15 <sup>24</sup>	25,1	17 <sup>30</sup>	25,4	25,3	25,3	0,03	0,17
13 <sup>12</sup>	25,3	15 <sup>26</sup>	25,7	17 <sup>32</sup>	26,2	26,0	26,0	0,06	0,24
13 <sup>14</sup>	26,4	15 <sup>28</sup>	26,4	17 <sup>34</sup>	27,2	27,1	26,9	0,19	0,44
13 <sup>16</sup>	27,0	15 <sup>30</sup>	27,2	17 <sup>36</sup>	28,0	27,7	27,6	0,17	0,41
13 <sup>18</sup>	28,4	15 <sup>32</sup>	27,9	17 <sup>38</sup>	29,0	29,1	28,7	0,45	0,67
13 <sup>20</sup>	29,3	15 <sup>34</sup>	28,8	17 <sup>40</sup>	30,1	30,0	29,6	0,53	0,73
13 <sup>22</sup>	30,9	15 <sup>36</sup>	29,7	17 <sup>42</sup>	31,1	31,6	30,8	0,97	0,98
13 <sup>24</sup>	31,8	15 <sup>38</sup>	30,8	17 <sup>44</sup>	32,0	32,5	31,8	0,76	0,87
13 <sup>26</sup>	33,0	15 <sup>40</sup>	31,6	17 <sup>46</sup>	33,0	33,7	32,8	1,15	1,08
13 <sup>28</sup>	34,0	15 <sup>42</sup>	32,9	17 <sup>48</sup>	34,1	34,7	33,9	0,84	0,92
13 <sup>30</sup>	35,7	15 <sup>44</sup>	34,0	17 <sup>50</sup>	35,1	36,4	35,2	1,44	1,20
13 <sup>32</sup>	36,4	15 <sup>46</sup>	35,0	17 <sup>52</sup>	36,0	37,1	36,0	1,10	1,05
13 <sup>34</sup>	37,7	15 <sup>48</sup>	36,7	17 <sup>54</sup>	37,8	38,4	37,6	0,75	0,86

Mittlerer Fehler:  $10,63 : 22 = 0,49$  pars =  $\pm 0,75$  mGal

Rückprofilen sind in Abb. 9 ersichtlich. Dort ist vom Unwetter nicht mehr viel zu sehen. Daß die Werte richtig sind, d. h. den wirklichen Schwerewerten entsprechen, läßt sich wieder wie früher durch Anbringung der Bouguerkorrekturen gemäß Abb. 8 zeigen. Aus der Tatsache, daß sich wieder eine fast lineare Schwereabnahme von Norden nach Süden ergibt wie bei der Schönwettermessung vom 27. 4. 56, darf man schließen, daß die Auswertung in Ordnung und daß die durchfahrene Strecke frei von lokalen Schwerestörungen ist. Der regionale negative Effekt in Richtung auf die Alpen beträgt auch hier ca.  $-1$  mGal pro km wie im oberen Teil des Sees. (14 mGal auf 14,6 km gegenüber 4,3 mGal auf 4,4 km).

Als Ergebnis der Messungen auf dem *Starnberger See* als dem Repräsentanten eines *Binnensees* wurde gefunden:

- 1) Bei windstillem Wetter ist eine Reproduzierbarkeit der Messungen auf 0,2 bis 0,3 mGal erreichbar, die durch Wiederholungsmessungen noch gesteigert werden kann. Dabei wurde die Schiffsposition nur durch Uhr, Kompaß und Landmarken ermittelt.

- 2) Bei etwas windigem, aber nicht stürmischem Wetter liegt die Reproduzierbarkeit der Messungen bei etwa 0,8 mGal (mittlerer Fehler der Einzelbeobachtung), sofern man die groben ins Auge fallenden durch den Seegang bedingten Abweichungen in der Weise eliminiert, daß man stets die tiefsten Werte miteinander verbindet und so den Profilverlauf interpoliert. Ein wesentlich genaueres Verfahren wäre die Berechnung der Brownkorrektur an Hand von Horizontalbeschleunigungsmessungen.
- 3) Die unter 1) und 2) gemachten Angaben beziehen sich auf ein 100-Tonnen Schiff und gelten nur für einen Binnensee.

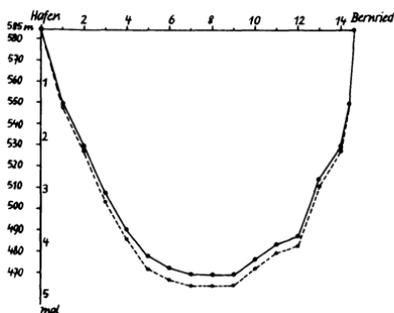


Abb. 8: Tiefenprofil längs der Fahrtroute Hafen-Starnberg-Bernried und entsprechende Bouguerwerte.

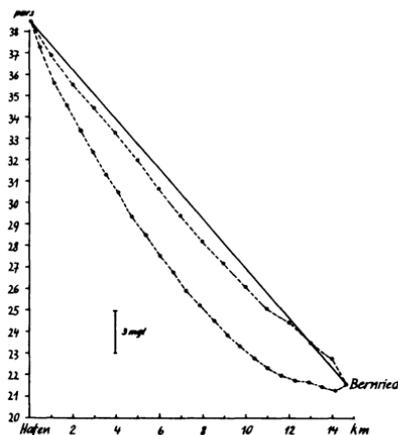


Abb. 9: Nach Bouguer reduzierte mittlere Schwerewerte längs des Meßprofils des Hafen-Starnberg-Bernried.

Nicht so günstig liegen die Verhältnisse auf dem Meere. Zwar kann man dort wesentlich größere und stabilere Fahrzeuge benutzen, aber der Wellengang ist erheblich komplizierter. Bei einem Binnensee fehlt die Dünung und die Wellen klingen schneller wieder ab, wenn die Oberfläche durch Wind oder andere Schiffe in Bewegung geraten ist. Der Seegang dauert also nur solange, als die Ursache wirkt. Auf dem Meere dagegen macht sich ein Sturm, der in einer ganz anderen Gegend stattfindet oder stattgefunden hat, durch seine Fernwirkung bemerkbar, und so kann die Wasseroberfläche auch an ganz windstillen Tagen unruhig sein. Während ein Schiff auf einem Binnensee fast nur Drehschwingungen um beide Hauptachsen ausführt, die im wesentlichen Horizontalbeschleunigungen hervorrufen, kommen auf hoher See Tauchschwingungen hinzu, die von beträchtlichen Vertikalbeschleunigungen begleitet sind. Schon ein periodisches Auf- und Abgetragenwerden des Schiffskörpers auf einer großen Welle um 1 cm verursacht bei einer 6-Sekunden-Periode eine Beschleunigung von 1000 mGal. ( $b = 4\pi^2 \cdot s/T^2$ ). Im Mittelmeer beispielsweise hat sich ge-

zeigt, daß auch bei blauem Himmel Vertikalamplituden von 6000 – 30000 mGal vorhanden sind, die bei Sturm bis 500 000 mGal und darüber anwachsen.

Um zu untersuchen, wie sich das Seegravimeter auf offenem Meere verhält, wurde am 20.5.56 bzw. 23.5.56 eine Meßfahrt auf der Adria an Bord der "Messapia" (5000 t) von Venedig nach Triest und zurück unternommen. Der italienischen Schiffsgesellschaft "Adriatica" und der Schiffsleitung der "Messapia" sei auch an dieser Stelle für ihr großzügiges und liebenswürdiges Entgegenkommen herzlichst gedankt, ebenso Prof. Morelli, der das Unternehmen vorbereitet und bestens unterstützt hat.

Die Apparatur konnte fast in Schiffsmittle nicht weit vom Metazentrum (Drehpunkt) des Schiffes entfernt aufgestellt werden. Während der etwa 5-stündigen Fahrt wurde fortlaufend registriert. Leider konnte nur die Rückfahrt ganz ausgewertet werden, da bei der Hinfahrt schon kurz nach der Abfahrt Sturm mit 80 km/Std. Windgeschwindigkeit aufkam. Nur der letzte Teil der Registrierung vom 20.5.56 ist ruhiger, als das Schiff nach einer Kursänderung senkrecht zu den Wellenfronten gelangte.

Bei der Rückfahrt am 23.5.56 um 7<sup>h</sup> früh hatte die Schiffsleitung einige Arbeiten an Bord vorzunehmen (Kompaßnachjustierungen etc.), die ein 2-stündiges Manövrieren in Hafennähe erforderlich machten. Erst um 9<sup>13</sup> befand sich das Schiff auf dem normalen Kurs in Richtung Venedig, nachdem es kurz vorher von 9<sup>03</sup> bis 9<sup>09</sup> auf offener See stillgestanden hatte (Abb. 18). Die Auswertung der Registrierung konnte daher erst von 9<sup>h</sup> ab erfolgen.

Aus Abb. 10 kann der Schiffsweg für beide Fahrrichtungen gemäß den Angaben der Schiffsleitung verfolgt werden. Aus den angegebenen Zeiten und Entfernungen lassen sich die Geschwindigkeiten berechnen, wie dies

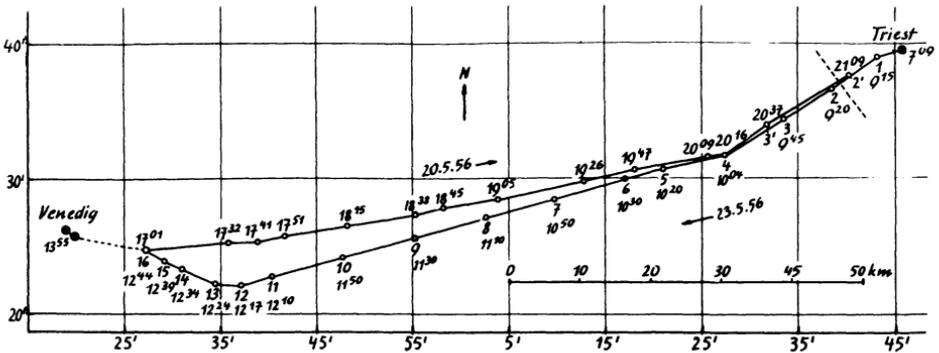


Abb. 10: Kurs der "Messapia" bei der Meßfahrt am 23.5.56 von Venedig nach Triest und 23.5.56 von Triest nach Venedig mit den von der Schiffsführung angegebenen Positionen.

Tabelle 7

1	2	3	4	5	6	7
Zeit	Meßpunkt	Entfernungsdiff. km	$v_{\text{km/Std.}}$	Kurs	Eötvöseff. mit lokal. Geschwind. $\beta = 45,5^\circ$	Eötvöseff. mit mittl. Geschwind. $\beta = 45,5^\circ$
9 <sup>13</sup>	1	7,52	26,5	235,5°	67,5 mGal	71,0 mGal
9 <sup>30</sup>	2	7,85	31,3	235,5°	67,5 mGal	71,0 mGal
9 <sup>45</sup>	3	9,30	29,3	235,5°	67,5 mGal	71,0 mGal
10 <sup>04</sup>	4	8,69	32,5	257,0°	83,8 mGal	83,8 mGal
10 <sup>20</sup>	5	5,38	32,3	257,0°	83,8 mGal	83,8 mGal
10 <sup>30</sup>	6	9,90	29,8	254,0°	82,5 mGal	82,5 mGal
10 <sup>50</sup>	7	9,90	29,8	254,0°	82,5 mGal	82,5 mGal
11 <sup>10</sup>	8	9,90	29,8	254,0°	82,5 mGal	82,5 mGal
11 <sup>30</sup>	9	9,90	29,8	254,0°	82,5 mGal	82,5 mGal
11 <sup>50</sup>	10	9,90	29,8	254,0°	82,5 mGal	82,5 mGal
12 <sup>10</sup>	11	4,29	36,8	254,0°	82,5 mGal	82,5 mGal
12 <sup>17</sup>	12	3,60	30,7	274,0°	84,7 mGal	85,5 mGal
12 <sup>24</sup>	13	4,97	29,8	296,0°	78,0 mGal	77,3 mGal
12 <sup>34</sup>	14	2,76	33,1	294,0°	80,3 mGal	78,5 mGal
12 <sup>39</sup>	15	2,62	31,4	294,0°	80,3 mGal	78,5 mGal
12 <sup>44</sup>	16					
211 Minuten		106,5 km	30,4 mittl. Geschw.			

in Tabelle 7 geschehen ist, um hieraus die Eötvöskorrekturen zu berechnen. Letztere rührt bekanntlich davon her, daß im zu messenden  $g$  ein Anteil der Erdfliehbeschleunigung enthalten ist. Fährt ein Schiff mit konstanter Geschwindigkeit nach Osten, also mit der Erddrehung, so wird die Fliehbeschleunigung vergrößert und damit ein negativer Schwereeffekt erzeugt, da die zur Erdoberfläche senkrechte Komponente vom Erdmittelpunkt wegweist. Bei einer Fahrt nach Westen wird die Fliehbeschleunigung verkleinert und das Gravimeter zeigt einen zu großen Wert an. Im gegebenen Fall muß bei Fahrtrichtung Triest-Venedig die Eötvöskorrektur vom gemessenen Schwerewert abgezogen werden. Ihr Betrag ist:

$$1) \quad C = 4,04 \cdot v_{\text{km/Std.}} \cdot \cos \phi \cdot \sin \alpha \text{ (mgl)}^2)$$

( $\phi$  = geografische Breite,  $\alpha$  = Azimut von Nord über Ost). Berechnet man nun aus Formel 1) die Eötvöskorrektur für die einzelnen Zeitabschnitte, wie dies in Tabelle 1 Spalte 6 geschehen ist, so stößt man bereits auf eine Schwierigkeit, die von grundlegender Art ist. Die in Spalte 4 auf Grund der Angaben von Spalte 1 und 3 ermittelten Geschwindigkeiten können unmöglich an einem windstillen Tag bei konstanter Drehzahl der Schrauben

bis zu 20% schwanken (von 26,5 bis 33,1 km/Std.). Die Toleranzen dürften vielmehr bei den Angaben über die Schiffspositionen liegen. Im gegebenen Fall ist es daher besser mit der mittleren Gesamtgeschwindigkeit von 30,4 km/Std. zu rechnen oder mit den einzelnen Gruppengeschwindigkeiten für die Meßpunkte gleichen Kurses. Bei der hier vorgenommenen Auswertung wurden letztere zu Grunde gelegt, da es immerhin möglich ist, daß die Schiffsgeschwindigkeit etwas von der Fahrtrichtung (von der Lage des Schiffskörpers zu den Wellenfronten) abhängt. Dementsprechend wurde Spalte 6 in Tabelle 7 benutzt.

Eine weitere Schwierigkeit betrifft die Ermittlung der Brownekorrektur; letztere beruht darauf, daß auf einem bewegten Fundament nicht das gleiche  $g$  gemessen wird wie auf einem ruhenden. Ein anfahrendes oder bremsendes Schiff hat eine Horizontalbeschleunigung, die sich zur Erdbeschleunigung geometrisch addiert, den Meßwert also stets vergrößert. Man kann daher eine Seegravimeterregistrierung nur innerhalb des Bereiches zur Auswertung verwenden, wo die Schiffsgeschwindigkeit konstant war (zuzüglich 5 Minuten Wartezeit wegen der starken Dämpfung des Gerätes), es sei denn, daß man die Geschwindigkeitsänderung mißt und berücksichtigt. Macht das Schiff eine Rollbewegung um eine seiner Achsen oder um beide infolge des Seeganges, so entstehen periodische Horizontalbeschleunigungen von der Art:

$$h = h_0 \sin 2\pi t/T = \frac{4\pi^2 s_0}{T^2} \cdot \sin 2\pi t/T, \text{ die über eine Periode integriert}$$

einen Zusatzvektor zu  $g_z$  von der Größe:

$$2) \quad \Delta g = (h_1^2 + h_2^2)/4g$$

ergeben. ( $h_1$  bzw.  $h_2$  sind die Amplituden der Horizontalbeschleunigungen in den beiden Schiffsachsenrichtungen,  $s_0$  der Weg). Die Bestimmung von  $h_1$  und  $h_2$  erfordert ein eigenes Gerät, nämlich einen Horizontalbeschleunigungsmesser bzw. -Schreiber, den es für diesen Zweck in idealer Ausführung noch nicht gibt. Alle derartigen Geräte (Seismometer, Geophone, Erschütterungsmesser, Schwingungsmesser etc.) sind ihrer Natur nach stark neigungsabhängig, da sie sinusempfindlich sein müssen. Bei 1° Neigung des Schiffes zeigen sie (statisch)  $g \cdot \sin\beta = 17500 \text{ mGal}$  an ( $h = g \cdot \sin\beta \pm h_1 \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}$ ) und dieser Betrag ist meist erheblich höher als jener, der gemessen werden soll ( $h_1$  bzw.  $h_2$ ). Hängt man den Horizontalbeschleunigungsmesser aber kardanisch auf, um ihn stets in Lotrichtung zu halten, so versagt er, weil dann das Gehäuse gegenüber der Masse eine Relativbewegung ausführt, die wegen ihrer Reibungsabhängigkeit von den Gelenken keine zuverlässige Zuordnung zum Meßwert erlaubt. Wahrschein-

lich ist die brauchbarste, wenn auch etwas schwerfällige Lösung die Verwendung einer Kreisel-Plattform, auf der der Beschleunigungsmesser richtig anzeigen würde, wenn der oder die Kreisel innerhalb einiger Perioden der Schiffsbewegung ( $c \cdot 6$  Sek.) nicht mehr als 1 Minute weglaufen. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Pendeln mit sehr langer Schwindungsdauer ( $c \cdot 27$  Sek.) gemäß dem Verfahren von *Vening Meinesz*.

Bei der hier zu besprechenden Adriameßfahrt stand mir ein geeigneter Horizontalbeschleunigungsmesser nicht zur Verfügung. Ich hatte zwar ein entsprechendes Gerät gebaut, das auf einem horizontalen Eich-tisch recht gut lineare Ausschläge ergab, aber an Bord konnte ich aus den bereits erwähnten Gründen keine zuverlässigen Werte erhalten. Ich schätze die bei der Rückfahrt vorhanden gewesenen  $h$ -Amplituden auf etwa 2000 bis 7000 mGal. Bei der Sturmfahrt am 20.5.56 dagegen dürften sie mehr als 20000 mGal betragen haben. Bezüglich der Abschätzung der Brownekorrektion ohne Meßgerät hat man einige Anhaltspunkte. Die Starnberger See-Messung hatte gezeigt, daß man bei kurzzeitigen Schiffsschwankungen die niedrigsten Schwerewerte miteinander verbinden soll, da der Browneeffekt immer positiv ist und er dadurch in der Wirkung reduziert werden kann. Betrachtet man den Registrierstreifen in Abb. 17 so erkennt man, daß bei einem Schiff die periodischen horizontalen und vertikalen Beschleunigungen miteinander gekoppelt sind (bei einer Drehbewegung erhält man eine Drehbeschleunigung, die sich aus einer vertikalen und einer horizontalen Komponente zusammensetzt) und daß daher bei Zunahme der periodischen Horizontalbeschleunigung auch die periodische Vertikalbeschleunigung anwächst. Die Ausschläge in Abb. 17 entsprechen vertikalen Beschleunigungsänderungen, da ein Gravimeter nur solche direkt anzeigt, sie verraten aber durch die *Größe ihrer Amplitude* auch die Größe der *horizontalen*, die mit ihnen verbunden sind. Macht ein Schiff nur Drehschwingungen, und keine Tauschschwingungen, wie dies meist auf Binnenseen der Fall ist, und benutzt man für die Messungen stets den gleichen Ort auf dem Schiff, so könnte man die *periodischen* Gravimeteramplituden näherungsweise geradezu in *horizontale* Milligal umeichen. Auf hoher See ist eine solche Zuordnung aber wegen der vorhandenen Tauschschwingungen zu ungenau, da dort auch reine Vertikalschwingungen (ohne horizontalen Anteil) vorhanden sind.

Man kann also in erster Näherung schon aus dem Gravimeterschrieb erkennen, ob größere Browneeffekte aufgetreten sind. Ist die Registrierung sehr ruhig, so muß auch die Horizontalbeschleunigung klein gewesen sein. In Abb. 11 sind die periodischen Amplituden auf der Fahrt Triest-Venedig roh skizziert. Man erkennt, daß sie in Küstennähe am geringsten waren, und daher dort auch die Browneeffekte am kleinsten gewesen sein müssen, wie die Übereinstimmung der gefundenen Schwerewerte mit jenen von *Morelli* auch beweist.

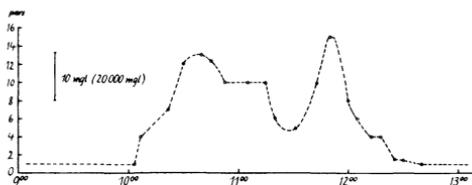


Abb. 11: Größe der Meßausschläge auf der Schwerregistrierung (Amplituden) Triest - Venedig am 23.5.56.

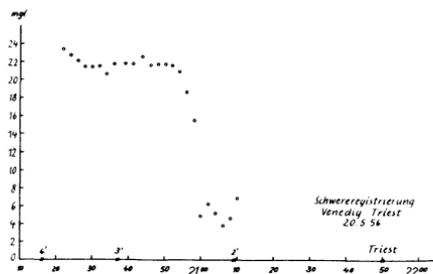


Abb. 12: Schwerewerte am 20.5.56 nach der Kursänderung um 20<sup>16</sup> nach Abzug der Eötvöskorrektion jedoch ohne Berücksichtigung des Browneffektes.

Die plötzliche Zunahme der Amplituden kurz nach 10<sup>h</sup> beruht auf einem Kurswechsel. Die Größe der  $h$ -Beschleunigungen hängt stark von der Stellung des Schiffskörpers zu den Wellenfronten ab, sie sind am kleinsten, wenn die Wellen vom Schiff senkrecht geschnitten werden.

Nun zu den Messungen selbst.

Wie schon erwähnt wurde, herrschte am 20.5.56 sehr starke Windtätigkeit (80 km/Std.). Die dadurch hervorgerufenen  $h$ -Beschleunigungen bewirkten einen Browneffekt von circa 100 mGal, der mangels einer geeigneten Apparatur nicht gemessen, sondern nur grob geschätzt werden konnte. Nur der letzte Teil des Profiles von 20<sup>16</sup> bis 21<sup>09</sup> wurde in Abb. 15 aufgetragen. Infolge einer Kursänderung um 20<sup>16</sup> gelangte das Schiff fast senkrecht zu den Wellen und beruhigte sich dadurch. Der Browneffekt ging, wie ein Vergleich mit der Rückmessung ergab, auf wenige Milligal zurück. Ab 21<sup>09</sup> verminderte das Schiff seine Geschwindigkeit successiv, so daß weitere Meßwerte nicht mehr ermittelt werden konnten außer dem Endwert im Hafen Triest.

Bei der Rückfahrt am 23.5.56 gegen 7<sup>h</sup> früh war das Wetter gut und der Seegang nur gering. Leider hatten sich die Heizakkumulatoren für den Thermostat in der Zwischenzeit entladen, wie ich am 22.5.56 bemerkte, als ich um 18<sup>h</sup> wieder an Bord ging. Die Temperatur war dadurch im Gerät von 38° auf 28° gesunken. Als das Schiff am 23.5.56 morgens den Hafen wieder verließ, war der Thermostat noch nicht wieder ganz eingelaufen, so daß sich ein etwas größerer Gang gegenüber dem normalen zeigte, was jedoch die Messungen nicht wesentlich beeinflusste. Wegen der bereits erwähnten 2-stündigen Manövrierung im Hafengebiet konnte mit der eigentlichen Registrierung erst gegen 9<sup>h</sup> begonnen werden, als sich das Schiff auf dem richtigen Kurs befand (Abb. 21 und 2<sup>o</sup>). Die Meßspindel wurde während der ganzen Fahrt nur zweimal verstellt, nämlich um 9<sup>20</sup> von 154,00 auf 155,01 (34,5 mGal = 18,7 pars) und um 13<sup>03</sup> wieder zurück von 155,01 auf 154,00. Um 10<sup>04</sup>, 10<sup>50</sup>, 12<sup>17</sup>, 12<sup>24</sup> und 12<sup>34</sup> erfolgten Kursänderungen

(Tabelle 7) und um 12<sup>44</sup> wurde die letzte Position bestimmt, ehe das Schiff mit verminderter Geschwindigkeit in die Lagunen Venedigs einfuhr. Wegen der häufigen Kursänderungen in den Kanälen und der nicht konstanten Schiffsgeschwindigkeit konnten die Messungen von 12<sup>44</sup> bis 13<sup>40</sup> nicht mehr ausgewertet werden. Nur der Endpunkt um 13<sup>42</sup> wurde festgelegt, als das Schiff an der Mole der Stazione Marittima festgemacht war. Bei einer Kurs- oder Geschwindigkeitsänderung ist eine Messung erst möglich, wenn der neue Kurs bzw. die neue Geschwindigkeit wenigstens 5 Minuten lang beibehalten wird wegen der langen Einstellzeit des Gravimeters.

Die Abb. 12, 13, und 14 enthalten die auf mGal umgerechneten Meßwerte nach Abzug der Eötvöskorrektion gemäß Tabelle 7 Spalte 6 ohne Brownekorrektur. Zum Vergleich sind die aus der Arbeit von C. Morelli (Rilievo

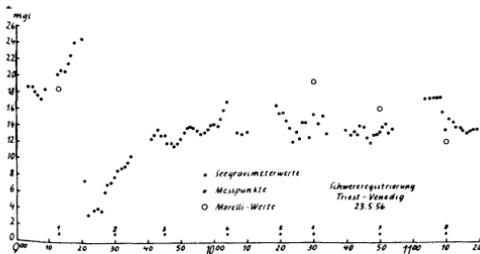


Abb. 13:

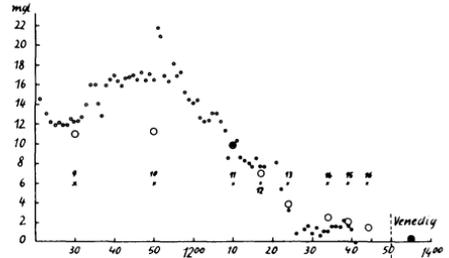


Abb. 14:

Schwerewerte am 23.5.56 nach Abzug der Eötvöskorrektion jedoch ohne Berücksichtigung des Browneeffektes.

gravimetrico dell'Alto Adriatico, Publ. dell' Istituto Nazionale de Geofisica Nr. 286, Roma) interpolierten, auf Meereshöhe bezogenen Schwerewerte (Seite 58, Spalte 5 plus 6) mit eingetragen. Aus Maßstabsgründen sind die Interpolationen aber höchstens auf 1 mGal genau. Man erkennt aus Abb. 12 und 13, daß die Übereinstimmung in Küstennähe, wo die Brownekorrektur klein ist, in Anbetracht der Unsicherheiten bei der Erfassung des Eötvös-

Tabelle 8

Meßpunkt	Abweichung	Meßpunkt	Abweichung
1	+ 1,5 mGal	11	0 mGal
6	- 5 mGal	12	+ 0,5 mGal
7	- 2,5 mGal	13	0 mGal
8	+ 2,5 mGal	14	- 1,2 mGal
9	+ 1,5 mGal	15	- 0,5 mGal
10	+ 5 mGal	16	- 0,5 mGal
		Venedig	0 mGal (Basis)

Mittlere Abweichung 1,7 mGal

effektes recht gut ist und auch in Meeresmitte die Abweichungen 5 mGal nicht übersteigen, ein Betrag, der innerhalb der Brownekorrektion liegt. Für die einzelnen Meßpunkte ergeben sich die aus Tabelle 8 ersichtlichen Abweichungen.

Leider liegen für die Meßpunkte 2, 3, 4 und 5 keine Vergleichswerte vor. Dort wurde eine ungewöhnlich starke Anomalie von ca. 18 mGal gefunden, die der Lage und der Größe nach mit jener bei der Hinfahrt (Abb. 12) beobachteten übereinstimmt, wenn auch bei letzterer der Browneeffekt die Meßwerte um einige mGal nach oben versetzte. Die Störungszone liegt bei 21<sup>05</sup> (am 20.5.56) und bei 9<sup>25</sup> (am 23.5.56), wo das Schiff fast die gleiche Stelle passierte (S. Abb. 10).

Es soll diese Anomalie aber vorerst noch nicht als gesichert gelten, da es durchaus möglich ist, daß die Eötvöskorrektion zu groß angenommen wurde. Würde beispielsweise der erste Wert in Tabelle 7 Spalte 4 richtig sein, so müßte das entsprechende Kurvenstück um 9 mGal nach oben verschoben werden. Außerdem liegt die fragliche Zone so nahe am Anfangs- bzw. Endpunkt der beiden Profile, daß die Möglichkeit besteht, daß das Schiff keine konstante Geschwindigkeit besaß, d. h. sich noch in der Anfahrtsbeschleunigung bzw. bereits in der Bremsverzögerung befand, wodurch natürlich ein Browneeffekt hervorgerufen wird.

Betrachtet man Abb. 11 nochmals in Verbindung mit den Abb. 13 und 14, so zeigt sich, daß zwischen 11<sup>10</sup> und 11<sup>30</sup> die periodischen Registrierausschläge merklich kleiner wurden und um 11<sup>50</sup> stark zunahmen. In Abb. 14 äußert sich diese Stelle so, daß die Übereinstimmung mit den Morelliwerten um 11<sup>30</sup> recht gut, dagegen um 11<sup>50</sup> eine Abweichung um etwa 5 mGal vorhanden ist. Dies bestätigt die Berechtigung der Annahme auf Seite  $\phi$ , wonach die Zu- bzw. Abnahme der periodischen vertikalen Amplituden (der periodischen Gravimeterausschläge) auch auf eine Zu- bzw. Abnahme der horizontalen Amplituden und damit des Browneeffektes schließen läßt.

Eine Betrachtung der Profilstücke v. 20<sup>h</sup> bis 21<sup>10</sup> am 20.5.56 und v. 9<sup>h</sup> bis 10<sup>04</sup> am 23.5.56 ergibt, daß die entsprechenden Kurven zwar eine (spiegelbildliche) Verwandtschaft zeigen, aber nicht miteinander identisch sind. Dies kann damit begründet werden, daß ein extrem stark gedämpftes Gravimeter auf einem schnell fahrenden Schiff eine Anomalie nicht in gleicher Weise wiedergibt, wenn es sie einmal vom Tief zum Hoch und ein andermal vom Hoch zum Tief überquert. Wegen der starken Dämpfung bleibt im ersteren Fall das Tief länger zurück (23.5.56), im anderen Fall das Hoch (20.5.56). In der Praxis wird man daher, sofern dies möglich ist, die Schiffsgeschwindigkeit an den einzelnen Meßpunkten verringern, und das Schiff senkrecht zu den Wellenfronten eindrehen.

*Folgerungen aus den bisherigen Meßergebnissen:*

Die erste Meßfahrt auf einem Hochseeschiff zeigte, daß es möglich ist,

bei ruhiger See Schweremessungen an Bord mit einer für geodätische Zwecke hinreichenden Genauigkeit auszuführen. Allerdings gilt diese Feststellung vorerst nur für das Mittelmeer bei der geringen Wassertiefe von maximal 30 m. Ob sie auch für die Atlantik und die Pazifik zutrifft, können erst weitere entsprechende Meßfahrten aufzeigen. Die hier besprochenen ersten Hochseemessungen hatten ihrer Anlage und Durchführung nach nur orientierenden Charakter. Zur völligen Ausnutzung der Genauigkeit des Seegravimeters hätten folgende Bedingungen erfüllt sein müssen:

1. Der günstigste Meßort auf dem Schiff wurde hier nur abgeschätzt. Er hätte durch Messungen ermittelt werden müssen.
2. Die Schiffsgeschwindigkeit sollte außer durch Zeit und Ortsbestimmung noch durch ein anderes Meßgerät überwacht werden. Am besten wäre es, wenn sie etwa 10-15 Minuten lang im Bereich der einzelnen Meßpunkte auf wenige Stundenkilometer reduziert werden könnte zwecks Verringerung der Unsicherheiten in der Bestimmung der Eötvöskorrektion. Die Schiffsgeschwindigkeit soll jedoch nicht Null sein, da ein fahrendes Schiff ruhiger im Wasser liegt als ein still stehendes.
3. Das Schiff soll zur Zeit der Messung nach Möglichkeit quer bzw. senkrecht zu den Wellen stehen.
4. Die wichtigste und unablässige Bedingung jedoch ist die fortlaufende Registrierung der *Horizontalbeschleunigung* zur Bestimmung des Browneffektes. Ohne Kenntnis dieser Größe ist die Messung der Schwere an Bord völlig unmöglich.

Zum Schluß sei noch auf einige Ausschnitte der Originalregistrierungen in der Anlage hingewiesen. (Abb. 15-24)

### Literatur

- [1] Graf, A.: Das Problem der Schweremessung auf See mit Gravimetern. Z. f. Geophysik. Jahrg. 20. 1954. H. 4.
- [2] Graf, A.: Beschreibung eines neuentwickelten Seegravimeters und Ergebnisse der ersten Meßfahrt auf dem Starnberger See an Bord der "Seeshaupt". Verlag der Bayr. Akademie d. Wiss. Abh. Neue Folge, Heft 75, Mü. 1956.
- [3] Meissner, O.: Praktische Geophysik. Dresden 1943. Verlag Steinkopff.

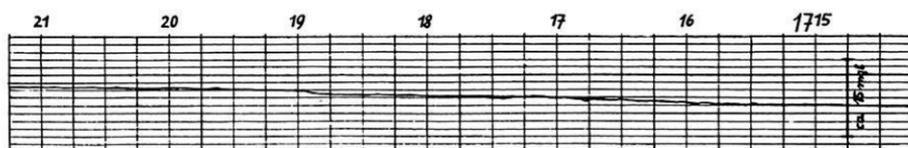


Abb. 15: Originalschwereregistrierung an Bord der "Tutzing" in voller Fahrt bei gutem Wetter, in Seemitte. 27.4.56.

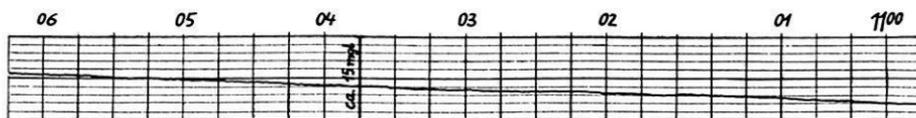


Abb. 16: Originalschwereregistrierung an Bord der "Tutzing" in voller Fahrt bei etwas windigem Wetter in Seemitte. 11.5.56.



Abb. 17: Originalregistrierung wie Abb. 19. Die "Bayern" kreuzt den Kurs der "Tutzing" und erzeugt starke Wellen, die das Schiff zum Schaukeln bringen und dadurch einen Browneffekt von mehreren mgal hervorrufen.



Abb. 18: Originalschwereregistrierung an Bord der "Messapia" bei ruhiger See, c. 3 km von Triest entfernt bei still stehendem Schiff.

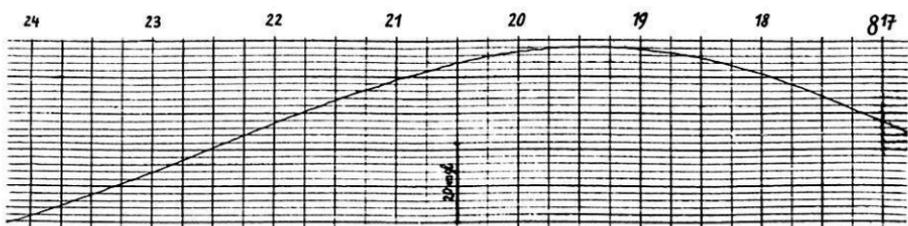


Abb. 19: Originalschwereregistrierung an Bord der "Messapia" bei langsamer Drehung des Schiffes und halber Fahrt in Küstennähe (Abstand etwa 3 km von Triest). Gut sichtbarer Eötvöseffekt.



Abb. 20: Originalschwereregistrierung an Bord der "Messapia" in ruhiger See bei voller Fahrt mit Kurs auf Venedig.

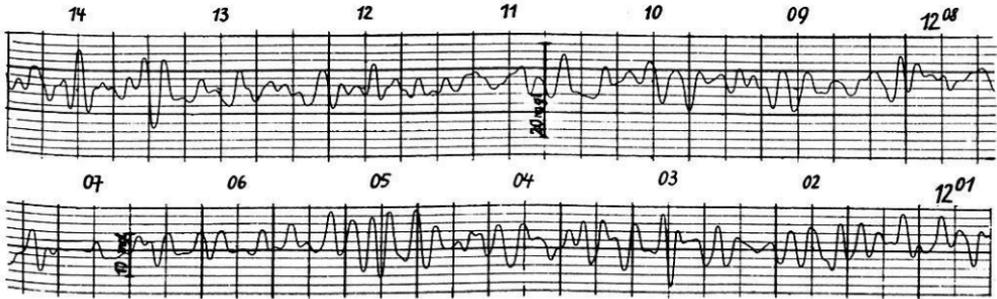


Abb. 21 und 22: Registrierung wie Abb. 23, jedoch in größerer Entfernung von der Küste und ungünstiger Lage des Schiffskörpers zur Wellenfront.

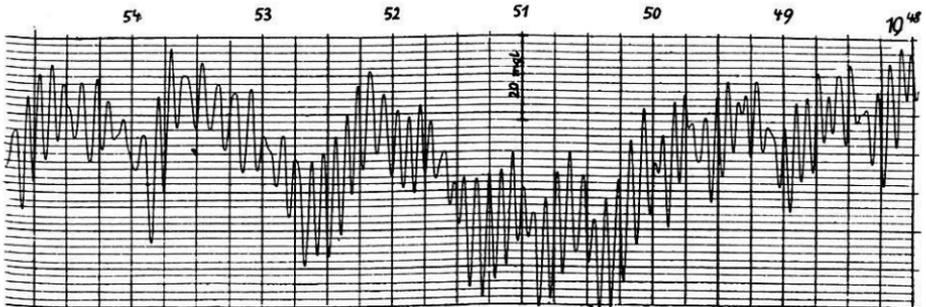


Abb. 23: Original-Schwereregistrierung an Bord der "Messapia" bei Sturm (80 km/Std. Windgeschwindigkeit) in Küstenferne.

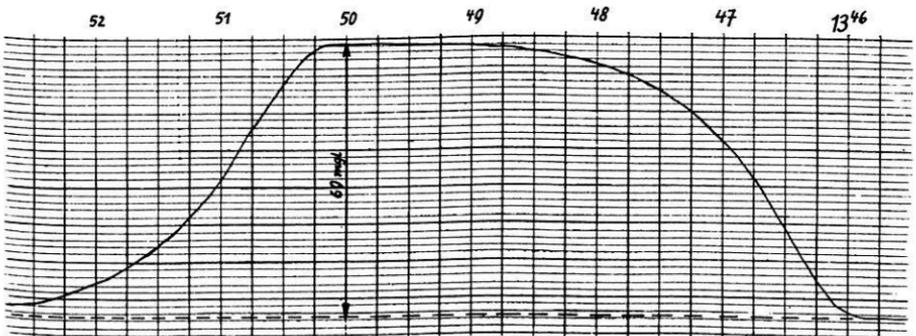


Abb. 24: Eichung an Bord der "Messapia" im Hafen Venedig, Schiff an der Mole. 2 Umdrehungen = 69 mgl = 37,3 Skalenteile).