

INNSBRUCKER FÖHNSTUDIEN II.

PERIODISCHE TEMPERATURSCHWANKUNGEN BEI FÖHN UND IHR ZUSAMMENHANG MIT STEHENDEN LUFTWELLEN

VON

ALBERT DEFANT.

ASSISTENT AM INSTITUTE FÜR KOSMISCHE PHYSIK DER K. K. UNIVERSITÄT IN INNSBRUCK

Mit 7 Textfiguren.

VORGELEGT IN DER SITZUNG AM 5. APRIL 1906.

Einleitung.

H. v. Ficker ist in seiner Abhandlung »Innsbrucker Föhnstudien I (Beiträge zur Dynamik des Föhns)«¹ zu dem Ergebnisse gekommen, daß bei mehrtägigen Föhnfällen der Gang der Temperatur in Innsbruck meistens durch tiefe Einschnitte gekennzeichnet ist. Durch solche »Föhnpausen« wird der Föhn in Innsbruck von selbst in eintägige Abschnitte zerlegt: Der Föhn erlischt in Innsbruck in den Abend- und Nachtstunden, während er in Igls mit unverminderter, ja sogar mit verstärkter Intensität weiterwehen kann. Dabei zeigt sich, daß bei solchen Föhnpausen die Temperatur in Innsbruck gewöhnlich unter die von Igls sinkt, also im Tale so lange Temperaturumkehr herrscht, bis der Föhn in Innsbruck in den Morgenstunden gleich nach Sonnenaufgang wieder durchbricht und eine rasche Temperaturerhöhung bringt, womit natürlich die Temperaturumkehr aufgehoben wird.

Durch die Aufstellung von selbstregistrierenden Apparaten an verschiedenen Orten des Inntales konnte Ficker nachweisen, daß diese Föhnpausen durch ein Vordringen kalter Luft aus dem Oberinntal verursacht werden. Da der Föhn im Oberinntal oft fehlt, wenn er in Innsbruck weht, ist die Möglichkeit geboten, daß in den Gebieten westlich von Innsbruck die Luft wesentlich kälter ist als in Innsbruck, so daß hier große Temperaturdifferenzen in unmittelbar nebeneinander lagernden Luftschichten entstehen können. Da solche nebeneinander liegende verschieden temperierte Luftmassen nicht im Gleichgewichte stehen, wird bei einer gewissen Temperaturdifferenz die kalte Luft als schwerere sich unter die warme einschieben, durch das Inntal abwärts fließen und in Innsbruck eine Föhnpause hervorrufen.

¹ Denkschr. der kais. Akad. d. Wiss., mathem.-naturw. Kl., Bd. 78 (1905).
Denkschr. d. math.-naturw. Kl. Bd. LXXX.

Im nahen Zusammenhange mit dieser Erscheinung der Föhnpausen stehen nun die fast bei allen Föhnfällen vom Thermographen aufgezeichneten, manchmal bedeutenden Temperaturschwankungen in Innsbruck, die sich oft in sehr regelmäßigen größeren und kleineren Intervallen wiederholen und von Föhnstößen begleitet sind. Ficker hat darauf hingewiesen, daß solche Schwankungen vor allem dann in Innsbruck auftreten, wenn die Temperatur in Innsbruck potentiell zu kalt gegenüber der Temperatur in höheren Lagen ist, das heißt, wenn das thermische Gleichgewicht in den zwei übereinander lagernden Luftschichten gestört erscheint. Solche Temperaturschwankungen sind deshalb in Innsbruck nicht vorhanden, wenn der Föhn normalerweise vollständig bis zur Talsohle durchgedrungen ist, und sie sind auch dann nicht vorhanden, wenn die Südströmung erst in relativ großer Höhe angetroffen wird, also noch nicht bis Igls durchgedrungen ist, so daß das ganze Talbecken bis hoch hinauf mit kalter Luft erfüllt ist. Dagegen treten solche Temperaturschwankungen besonders bei Beginn und während der Dauer einer Föhnpause in Innsbruck auf, das heißt dann, wenn in der Höhe des Mittelgebirges, in Igls, der Föhn schon weht oder noch weht und dementsprechend Temperaturumkehr bis zur Höhe des Mittelgebirges vorhanden ist. Ficker weist nun in seiner früher zitierten Abhandlung für diese Erscheinung, ohne auf sie des näheren einzugehen, auf zwei verschiedene Erklärungsmöglichkeiten hin. Zunächst sind für ihn »diese lebhaften, oft regelmäßig aufeinander folgenden Schwankungen Durchbruchversuche der warmen Föhnströmung durch die kalte, im Tale stagnierende Luft. Die Schwankungen sind somit eine Erscheinung, welche den Umwandlungsprozeß der extrem anomalen Verhältnisse in normale begleiten.« Wenn solche Temperaturschwankungen öfters mehrere Tage anhalten, dann muß die kalte Luft immer von neuem Zufuhr erhalten und Ficker sucht dieses Kältereservoir in den westlich von Innsbruck gelegenen kalten Gebieten des Oberinntales. Er erklärt somit hier diese Schwankungen der Temperatur als Föhnpausen von viel kürzerer Dauer und verminderter Intensität.

Andererseits weist Ficker noch auf eine andere Erklärungsweise hin, welche mit der früheren in keiner Beziehung steht und von ihr genau unterschieden werden muß. Helmholtz hat gezeigt, daß an der Grenzfläche zweier verschieden temperierter Luftschichten Wogenbildung entstehen muß, wenn sich die Luftmassen relativ gegeneinander in Bewegung befinden, wenn also zum Beispiel eine warme Strömung über eine kältere stagnierende Luftschicht hinwegweht. Solche Verhältnisse herrschen nun tatsächlich im Inntale bei Föhnpausen oder vor Beginn des Föhns in Innsbruck, womit zugleich die Möglichkeit zur Entstehung solcher Helmholtz'scher Wellensysteme gegeben wäre. In den Wellentälern sinkt die warme Luft in ein tieferes Niveau hinab; es wäre somit denkbar, daß der Vorübergang eines Wellentales unmittelbar über eine Station sich hier als Temperaturerhöhung äußern würde. Die Regelmäßigkeit in der zeitlichen Dauer und der Intensität aufeinanderfolgender Temperaturschwankungen, würde so nach Ficker ungezwungen durch Annahme Helmholtz'scher Luftwogen im Inntale erklärt werden können. Geht man jedoch näher auf die Untersuchung dieser Schwankungen ein, namentlich auf die Möglichkeit des Auftretens solcher fortschreitender Helmholtz'scher Luftwogen, stößt man auf größere Schwierigkeiten und Bedenken, so daß überhaupt diese Erklärungsweise ins Wanken gerät.

Da nun in Innsbruck das Auftreten solcher Temperaturwellen bei Föhn besonders prägnant und auffällig ist, die gegebenen Erklärungen aber kaum mehr als Vermutungen über die Entstehungsweise der Erscheinung sind, schien es wünschenswert, diese Temperaturschwankungen eingehender zu untersuchen. Um so mehr wurde man auf diese Untersuchung hingewiesen, als bei den Regenfällen im Jahre 1905, welche in Innsbruck ebenfalls speziell untersucht worden sind, in dem Verlauf wellenförmige Schwankungen der Intensität der Regenstärke gefunden wurden. Zur genaueren Untersuchung dieser Schwankungen boten die Aufzeichnungen eines großen selbstregistrierenden Thermographen von Richard mit 48 Stunden Umlaufzeit, der am Innsbrucker meteorologischen Observatorium seit 1896 aufgestellt ist, ein sehr geeignetes Material. Es steht somit zur Untersuchung dieser Frage ein Beobachtungsmaterial von 10 Jahren zur Verfügung. Da bei dem großen Thermographen einer Stunde eine Strecke von 7·7 mm auf dem Papier entspricht, so können die Temperaturschwankungen auf einer solchen Strecke noch sehr deutlich und schön dargestellt werden, so daß sich namentlich die zeitliche Dauer der einzelnen Wellen

mit einiger Genauigkeit ermitteln läßt. Auch die Amplituden der einzelnen Temperaturstufen können (da $1^{\circ}\text{C. } 2\text{mm}$ entsprechen) noch sehr gut abgelesen werden.

Bei Bearbeitung des Materials wurde nun in folgender Weise vorgegangen: Zunächst wurden die Temperaturwellen der Jahre 1904 und 1905 auf ihre zeitliche Dauer und ihren Zusammenhang mit den Föhnpausen untersucht, namentlich aus dem Grunde, weil seit Jänner 1904 in Igls (876 m) eine Beobachtungsstation zum Zwecke von Föhnstudien ausgerüstet wurde, also die Abhängigkeit der Erscheinung von eventuell vorhandenen Temperaturumkehrungen untersucht werden konnte. Hierauf wurde auf die Untersuchung der Temperaturwellen der früheren Jahre seit 1896 zurückgegangen, in welchen nur die Aufzeichnungen des großen Innsbrucker Thermographen vorliegen. Es soll dementsprechend auch in der Gliederung dieser Arbeit zunächst das Material aus den Jahren 1904 und 1905, dann jenes von 1896 bis 1903 eingehend besprochen und hierauf versucht werden, aus den gewonnenen Ergebnissen eine Deutung der Ursachen dieser Temperaturschwankungen zu geben. Um von vornherein klarzustellen, welcher Art die Temperaturwellen, von denen hier die Rede ist, seien, soll dies zunächst an der Hand einiger Diagramme, bei welchen diese periodischen Temperaturschwankungen in charakteristischer Weise zu Tage treten, dargelegt werden.

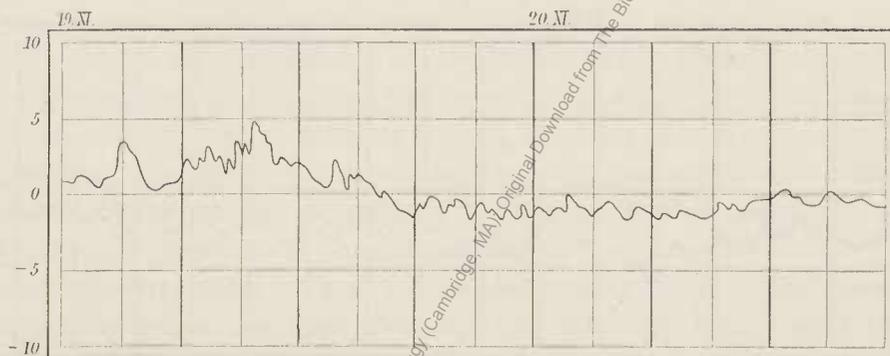


Fig. 1. Föhn vom 19. und 20. November 1898.

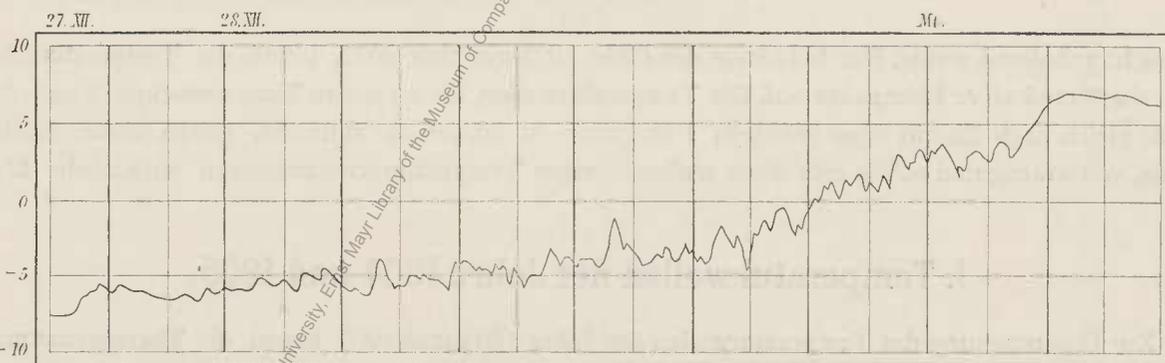


Fig. 2. Föhn vom 27. und 28. Dezember 1898.

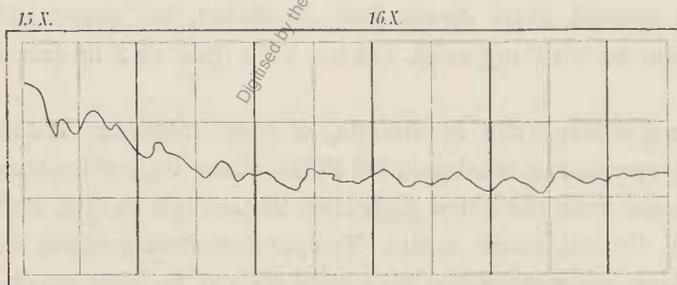


Fig. 3. Föhn vom 15. und 16. Oktober 1901.

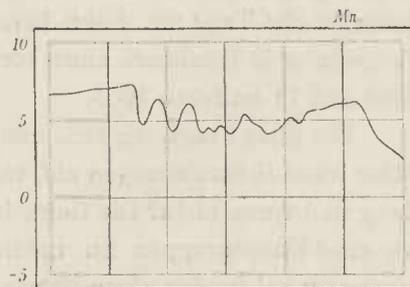


Fig. 4. Föhn vom 19. November 1902

Bei den in den Diagrammen wiedergegebenen Föhnfällen war fast durchwegs der Föhn in Innsbruck nicht zum Durchbruche gekommen. Es sind also Fälle, bei denen der Föhn in Innsbruck nur stoßweise

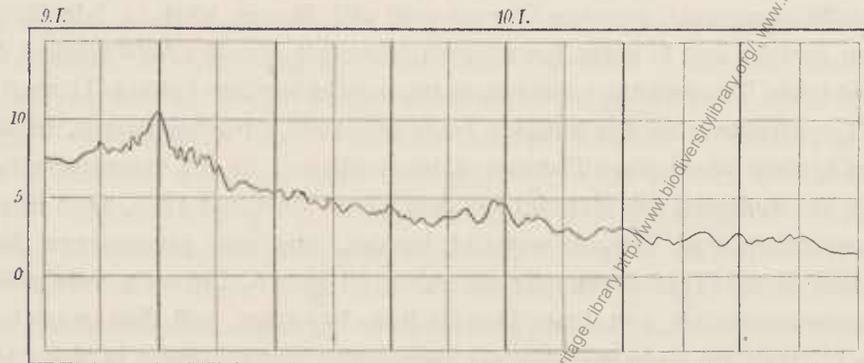


Fig. 5. Föhn vom 9. und 10. Jänner 1898.

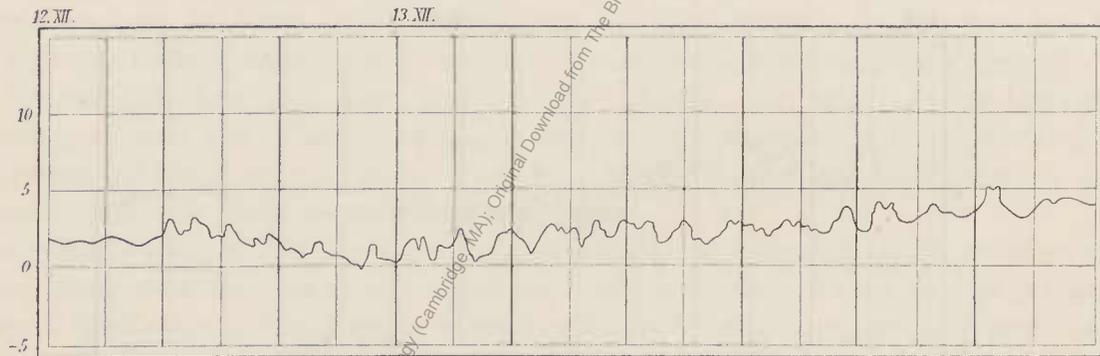


Fig. 6. Föhn vom 12. und 13. Dezember 1897.

und nicht anhaltend wehte. Nur bei einem der Fälle, 19. November 1902, treten die Temperaturschwankungen während einer Föhnpause auf. Die Temperaturwellen, die an jenem Tage zwischen 9 und 10 Uhr abends gleich nach Eintritt einer kräftigen Föhnpause in Innsbruck auftraten, geben einen deutlichen Beweis, wie kräftig und schön sich diese wellenförmigen Temperaturschwankungen entwickeln können.

I Temperaturwellen der Jahre 1904 und 1905.

Zur Untersuchung der Temperaturwellen der Jahre 1904 und 1905 liegen die Thermogramme des großen Thermographen der Beobachtungsstation Innsbruck vor, weiters die Thermogramme eines kleinen Thermographen der Föhnstation Igls (876 m). Aus den Thermogrammen von Innsbruck und Igls wurden zunächst alle Tage mit Föhn herausgesucht und speziell unter diesen jene bearbeitet, bei denen die Temperatur in Innsbruck einen wellenförmig schwankenden Gang zeigt. Solcher Fälle gab es 7 im Jahre 1904 und 11 im Jahre 1905.

Die erste Frage, die sich uns bei Untersuchung dieser Fälle aufdrängte, war die folgende: Wann treten diese Schwankungen auf, wann zeigt die Temperatur in Innsbruck bei Föhn einen wellenförmigen Gang und wann nicht? Die Betrachtung der Thermogramme der höher gelegenen Station Igls zeigte, daß wir zwei Hauptgruppen zu unterscheiden haben. Einmal treten solche Temperaturschwankungen in Innsbruck bei Beginn eines Föhns auf, das heißt dann, wann der Föhn noch nicht bis zur Talsohle durchgedrungen ist, dann aber auch bei Föhnpausen. Dies steht in Übereinstimmung mit Fick er's Ergebnissen.

Was das zeitliche Auftreten dieser Temperaturschwankungen anbelangt, so ist von beiden Gruppen übereinstimmend zu sagen, daß sie gewöhnlich nur in den Abend-, Nacht- und Morgenstunden vorkommen, während sie in den meisten Fällen mit Sonnenaufgang erlöschen und tagsüber in der Regel fehlen. Die Dauer dieser Schwankungen hängt jedenfalls in erster Linie von der Intensität und der Dauer der Föhnströmung selbst ab; in diesem Punkte zeigen aber beide Gruppen einen wesentlichen Unterschied: Von den 18 Fällen in den Jahren 1904 und 1905 entfallen 9 Fälle auf die erste und ebenfalls 9 Fälle auf die zweite Gruppe. Die Dauer der Temperaturwellen vor Föhndurchbruch weist aber bei allen 9 Fällen insgesamt eine Dauer von 118 Stunden 14 Minuten auf, so daß auf jeden Fall eine mittlere Dauer von 13 Stunden 8 Minuten entfällt, während die Dauer der Temperaturwellen bei Föhnpausen insgesamt nur 65 Stunden 37 Minuten beträgt, so daß die mittlere Dauer eines einzelnen Falles bloß 7 Stunden 17 Minuten beträgt. Die Fälle der ersten Gruppe nehmen somit eine viel längere Zeitdauer in Anspruch als die der zweiten Gruppe. Übrigens ist diese Tatsache nicht verwunderlich. Die Föhnpausen treten nur in den späten Nachtstunden auf und erlöschen immer mit Sonnenaufgang. Die mit ihnen verbundenen Temperaturschwankungen sind somit nur auf diese kurze oder (da sie nie die ganze Dauer einer Föhnpause einnehmen) auf ein noch kürzeres Intervall beschränkt, während die Temperaturschwankungen vor Föhndurchbruch so lange in Innsbruck anhalten, bis eben der Föhn zur Talsohle durchgedrungen ist. Da dieser Kampf um die Vorherrschaft im Tale ganze Tage hindurch anhalten kann, ist von selbst eine längere Dauer der Temperaturschwankungen in der ersten Gruppe (vor Föhndurchbruch) gegeben. Auch die Häufigkeit im Auftreten der Fälle der ersten Gruppe ist größer als bei jenen der zweiten Gruppe, da ja Föhnpausen in Innsbruck nur dann vorkommen können, wenn wir es mit einem mehrtägigen Föhne zu tun haben. Die Erfahrung zeigt aber, daß die meisten Fälle und namentlich jene Fälle, bei denen die Temperatur in Innsbruck einen schönen wellenförmigen Gang zeigt, nicht besonders stark entwickelte Föhne sind und somit selten länger als 24 Stunden anhalten.

Über die Temperaturverhältnisse im Inntale beim Auftreten solcher Temperaturwellen geben die Temperaturdifferenzen der beiden Stationen Innsbruck und Igls Aufschluß, welche in den folgenden Tabellen I und II für alle Fälle der Jahre 1904 und 1905 wiedergegeben sind. Die einzelnen Fälle sind getrennt nach beiden früher erwähnten Gruppen. Der Anfang und das Ende der Temperaturschwankungen sind durch fettgedruckte Temperaturdifferenzen angegeben.

Jahr	Gruppe	Datum	Uhrzeit	Temperaturdifferenz Innsbruck - Igls		Anfang	Ende	Dauer
				Beginn	Ende			
1904	I	1. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	I	2. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	I	3. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	I	4. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	I	5. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	I	6. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	I	7. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	I	8. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	I	9. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	10. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	11. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	12. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	13. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	14. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	15. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	16. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	17. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	18. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	19. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	20. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	21. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	22. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	23. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	24. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	25. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	26. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	27. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	28. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	29. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	30. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1904	II	31. 10.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	I	1. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	I	2. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	I	3. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	I	4. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	I	5. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	I	6. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	I	7. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	I	8. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	I	9. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	10. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	11. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	12. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	13. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	14. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	15. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	16. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	17. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	18. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	19. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	20. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	21. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	22. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	23. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	24. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	25. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	26. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	27. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	28. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	29. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	30. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00
1905	II	31. 11.	18.00	1.0	1.0	18.00	19.00	1.00

Tabelle I.

Temperaturdifferenzen

Tageszeit	8./I.	9./I.	12./I.	13./I.	14./I.	6./XII.	7./XII.	16./I.	17./I.	27./III.	28./III.
	1904							1905			
Vorm. 1h	—	— 6.4	—	— 1.2	0.3	—	— 4.0	—	— 0.6	—	— 0.6
2h	—	— 7.0	—	0.0	— 0.6	—	— 5.7	—	— 2.2	—	— 1.0
3h	—	— 6.0	—	— 0.9	— 1.7	—	— 4.1	—	— 3.3	—	— 0.3
4h	—	— 5.5	—	— 1.3	— 0.8	—	— 5.2	—	— 3.9	—	— 1.6
5h	—	— 4.4	—	— 1.7	1.9	—	— 4.5	—	— 3.3	—	— 1.0
6h	—	— 4.7	—	— 1.9	— 1.1	—	— 4.2	—	— 4.8	—	— 2.0
7h	—	— 4.6	—	— 1.6	— 0.4	—	— 4.6	—	— 4.8	—	— 1.5
8h	—	— 3.1	—	— 2.6	— 2.7	—	— 4.4	—	— 5.4	—	— 0.9
9h	—	— 3.2	—	— 1.0	— 1.2	—	— 2.0	—	— 5.5	—	— 1.2
10h	—	— 3.0	—	— 2.7	1.1	—	— 1.5	—	— 5.1	—	1.4
11h	—	— 3.0	—	— 1.2	2.1	—	— 0.9	—	— 0.1	—	1.4
Mittag	—	— 1.2	—	— 0.7	1.5	—	— 0.5	—	1.0	—	2.0
Nachm. 1h	— 2.2	—	—	— 0.2	—	—	— 0.1	—	1.3	—	—
2h	— 2.0	—	—	— 1.8	—	—	0.1	—	1.2	—	—
3h	— 2.3	—	—	0.1	—	—	0.5	—	1.4	—	—
4h	— 1.8	—	—	1.2	—	— 1.7	0.9	—	1.8	—	—
5h	— 1.9	—	— 0.6	1.4	—	— 2.6	1.0	— 1.7	—	—	—
6h	— 1.9	—	— 0.3	1.3	—	— 4.4	0.3	— 2.0	—	—	—
7h	— 1.7	—	— 0.8	0.4	—	— 4.8	1.1	— 1.5	—	—	—
8h	— 2.3	—	— 1.4	0.3	—	— 3.8	0.8	— 1.7	—	—	—
9h	— 3.7	—	— 1.3	0.2	—	— 3.3	— 2.0	— 2.3	—	—	—
10h	— 7.0	—	— 1.9	— 0.7	—	— 4.0	— 0.1	— 2.1	—	1.4	—
11h	— 7.3	—	— 1.8	0.2	—	— 4.7	0.9	— 2.1	—	1.0	—
Mitternacht	— 7.1	—	— 2.2	0.0	—	— 4.9	— 0.5	— 0.9	—	0.0	—

Tabelle II.

Temperaturdifferenzen

Tageszeit	8./III.	9./III.	13./IV.	14./IV.	25./VII.	15./III.	16./III.	9./IV.	10./IV.	11./IV.	2./V.	28./VII.	29./VII.
	1904					1905							
Vorm. 1h	— 0.5	— 3.8	—	— 2.5	1.1	—	0.3	—	— 0.6	1.2	1.6	—	— 0.1
2h	— 0.5	— 4.0	—	— 3.6	2.3	—	0.6	—	— 1.1	— 0.4	0.9	—	1.2
3h	— 1.5	— 4.7	—	— 3.1	2.4	—	0.6	—	— 2.6	— 0.1	— 2.0	—	— 2.0
4h	— 2.5	— 4.0	—	— 2.1	1.0	—	0.6	—	— 3.2	— 1.7	— 2.7	—	— 2.7
5h	— 2.2	— 3.0	—	— 3.0	0.0	—	— 0.1	—	— 3.0	0.1	— 0.8	—	— 3.2
6h	— 2.8	— 1.9	—	— 1.9	1.7	—	0.6	—	— 2.9	1.3	— 3.2	—	— 3.5
7h	— 3.1	— 1.3	—	— 1.5	0.3	—	0.0	—	— 3.2	— 2.6	— 0.3	—	— 2.5
8h	— 2.1	— 0.6	—	— 0.7	1.2	—	0.1	—	— 1.3	— 1.2	1.9	—	— 2.2
9h	— 0.9	— 0.8	—	0.0	1.8	—	0.3	—	— 0.4	0.7	1.9	—	0.1
10h	0.0	— 1.5	—	0.6	5.0	—	1.0	—	1.4	2.0	2.7	—	2.6
11h	— 0.1	— 0.3	—	1.3	4.6	—	1.7	—	2.6	2.7	2.8	—	3.0
Mittag	0.2	2.2	—	1.3	5.2	—	1.8	—	2.9	1.9	2.8	—	2.7

Innsbruck—Igls.

30./VI.	1./VII.	18./XI.	19./XI.	26./XI.	27./XI.	27./XII.	28./XII.	29./XII.	Tageszeit
1905									
—	— 1·6	—	— 4·4	—	— 4·7	—	— 4·6	— 2·8	Vorm. 1 ^h
—	— 2·2	—	— 6·1	—	— 4·7	—	— 3·3	— 3·0	2 ^h
—	— 1·7	—	— 5·5	—	— 4·6	—	— 4·2	— 3·2	3 ^h
—	— 3·0	—	— 6·3	—	— 3·6	—	— 3·0	— 2·1	4 ^h
—	— 3·4	—	— 7·0	—	— 2·3	—	— 3·0	— 0·3	5 ^h
—	— 3·4	—	— 7·2	—	— 2·6	—	— 3·6	— 0·9	6 ^h
—	— 2·5	—	— 6·7	—	— 3·1	—	— 2·8	— 0·7	7 ^h
—	— 0·9	—	— 7·9	—	— 3·9	—	— 3·0	— 0·7	8 ^h
—	— 0·3	—	— 2·9	—	— 5·4	—	— 3·4	— 0·3	9 ^h
—	— 1·2	—	— 6·2	—	— 4·4	—	— 3·4	— 0·0	10 ^h
—	— 2·2	—	— 1·0	—	— 3·2	—	— 2·6	—	11 ^h
—	— 1·8	— 0·9	— 0·0	—	— 2·9	— 2·8	— 1·2	—	Mittag
—	—	— 0·7	—	—	—	— 2·0	— 1·0	—	Nachm. 1 ^h
—	—	— 1·3	—	—	—	— 1·3	— 0·8	—	2 ^h
—	—	— 1·5	—	—	—	— 1·0	— 0·3	—	3 ^h
—	—	— 2·4	—	—	—	— 1·8	— 0·4	—	4 ^h
—	—	— 2·7	—	—	—	— 2·9	— 2·0	—	5 ^h
—	—	— 3·4	—	— 1·9	—	— 3·4	— 2·7	—	6 ^h
—	—	— 3·7	—	— 1·7	—	— 3·3	— 1·6	—	7 ^h
—	—	— 4·2	—	— 1·9	—	— 3·1	— 1·4	—	8 ^h
—	—	— 5·3	—	— 3·6	—	— 3·2	— 2·5	—	9 ^h
— 0·1	—	— 5·1	—	— 2·9	—	— 3·9	— 3·8	—	10 ^h
— 2·2	—	— 4·9	—	— 3·0	—	— 3·8	— 3·4	—	11 ^h
— 2·8	—	— 4·1	—	— 4·4	—	— 4·2	— 2·8	—	Mitternacht

Innsbruck—Igls.

Tageszeit	8./III.	9./III.	13./IV.	14./IV.	25./VII.	15./III.	16./III.	9./IV.	10./IV.	11./IV.	2./V.	28./VII.	29./VII.
1904													
1905													
Nachm. 1 ^h	1·8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2 ^h	1·9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3 ^h	2·5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4 ^h	2·0	—	1·5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5 ^h	2·1	—	1·3	—	—	—	—	0·1	—	—	—	—	—
6 ^h	1·8	—	1·8	—	—	—	—	0·9	—	—	—	2·3	—
7 ^h	1·4	—	1·7	—	—	—	—	1·6	—	—	—	2·4	—
8 ^h	1·7	—	1·4	—	—	—	—	1·5	—	—	—	2·4	—
9 ^h	1·2	—	1·5	—	—	2·2	—	0·7	2·4	—	—	2·2	—
10 ^h	— 0·4	—	0·8	—	—	1·9	—	0·0	2·4	—	—	2·1	—
11 ^h	— 1·1	—	— 0·8	—	—	1·6	—	— 1·2	1·3	—	—	0·4	—
Mitternacht	— 2·8	—	— 1·6	—	—	1·3	—	— 1·0	1·3	—	—	— 0·5	—

Die Betrachtung der einzelnen Fälle beider Gruppen bestätigt das schon von Ficker gefundene Resultat: Wenn die Temperaturschwankungen in Innsbruck auftreten, ist meistens die Temperaturdifferenz Innsbruck—Igls negativ. Daß Innsbruck potentiell zu kalt ist, zeigt sich bei allen Fällen ohne Ausnahme. Zum Beginn der Schwankungen scheint eine bestimmte negative Temperaturdifferenz zu gehören. Die Luftschichten unmittelbar über Innsbruck müssen eine niedrigere Temperatur haben als die darüberlagernden. Wir finden somit bei Temperaturschwankungen im Tale kalte Luft, die bis ungefähr zur Höhe des Mittelgebirges reichen wird und darüber die warme Föhnströmung. Die Temperaturwellen dauern so lange als die Temperaturdifferenzen negativ sind und erlöschen mit dem Auftreten positiver Werte.

Für Föhnpausen gilt das gleiche. Temperaturschwankungen treten bei Föhnpausen nur dann ein, wenn die Störung in Innsbruck so stark ist, daß die Temperaturdifferenz Innsbruck—Igls negativ wird.

Es ist somit die Temperaturumkehr im Innental eine notwendige Bedingung zum Entstehen und Auftreten solcher Temperaturwellen. Der Temperaturgang von Igls zeigt solche Schwankungen nur selten. Während in Innsbruck diese Temperaturwellen intensiv auftreten, bleibt die Temperatur in Igls oft auf gleicher Höhe oder sie zeigt nur unmerkliche Schwankungen, die weder in Bezug auf Intensität noch in Bezug auf Regelmäßigkeit mit denen in Innsbruck zu vergleichen sind.

Der Umstand, daß beim Erscheinen von solchen Temperaturschwankungen in Innsbruck immer auch Temperaturumkehr im Innental bis etwa zur Höhe des Mittelgebirges vorhanden ist, legt den Gedanken nahe, die an der Grenze der beiden verschieden temperierten Luftschichten im Innental möglicherweise auftretenden Wogenbildungen seien die Ursache jener zahlreichen und intensiven Temperaturschwankungen. Die Temperaturwellen wären dann eine Folge jener Luftwogensysteme, die nach Helmholtz an der Grenze zweier Luftschichten von verschiedener Temperatur und verschiedener relativer Geschwindigkeit theoretisch auftreten müssen und in der freien Atmosphäre auch zu wiederholten Malen nachgewiesen worden sind.

Um zur Beurteilung dieser Frage weitere Anhaltspunkte zu erhalten, schien vor allem eine genauere Untersuchung der Periode und Amplitude dieser Schwankungen nötig. Der Vorgang, der hierbei eingehalten wurde, ist der folgende: Da einer Stunde eine Strecke von 7.7 mm entspricht, so entfallen auf eine Minute 0.13 mm . Die kleinste Strecke, welche man mit einiger Übung noch genau bestimmen kann, ist eine Strecke von 0.4 mm . Man ist somit in der Lage, die zeitliche Entfernung zweier Temperaturmaxima oder -minima aus den Thermogrammen bis auf drei Minuten genau anzugeben. Es geschah dies so, daß von jedem Stundenstriche aus mittels feiner Zirkelspitzen die Strecke bis zum folgendem Maximum in der nächsten Stunde abgemessen und sodann auf einer entsprechenden Skala die Zeit abgelesen wurde, zu welcher dieses Maximum eingetreten war. Die so ermittelte Eintrittszeit des Maximums in Minuten wurde in eine große Tabelle eingetragen. Hierauf wurde vom gleichen Stundenstriche aus zum nächstfolgenden Maximum, das noch in die gleiche Stunde fiel, übergegangen und auch dessen Eintrittszeit unter dem vorausgehenden in die Tabelle eingetragen. So wurde von Maximum zu Maximum vorgeschritten, immer mit Benützung der zunächstgelegenen Stundenmarke als Ausgangspunkt. Dadurch, daß man von einem gegebenen Stundenstriche aus, die Eintrittszeiten eines jeden in der darauffolgenden Stunde eingetretenen Maximums bestimmte, war es möglich, das Zeitintervall zwischen zwei Maxima genauer anzugeben, als wenn man direkt von Maximum zu Maximum die dazwischenliegende Zeitdauer ermittelt hätte. Durch Subtrahieren des ersten Wertes vom zweiten war dann von selbst die Zeit, welche verstrichen war, um vom ersten Maximum zum zweiten zu gelangen, gegeben. So wurden für jeden einzelnen Fall, wenn der Thermograph in Innsbruck bei Föhn Temperaturwellen angab, die Eintrittszeiten der Maxima von Stunde zu Stunde ermittelt, wobei bemerkt werden muß, daß gewöhnlich alle Maxima, die in der Thermographenkurve nur einigermaßen hervortraten, als solche aufgefaßt wurden. Für jeden einzelnen Fall erhielt man somit eine große Tabelle, aus welcher man dann leicht die Intervalle, in denen die Maxima aufeinanderfolgen, bestimmen konnte.

Nachdem diese großen Tabellen erhalten worden waren, wurden die Zeitintervalle zwischen zwei Maxima, also die vorkommenden Periodenlängen nach Gruppen von 4 zu 4 Minuten zusammengestellt, derart, daß in die erste Gruppe alle jene Periodenlängen zusammengefaßt wurden, welche eine kleinere Zeitdauer als 4 Minuten besaßen. Auf diese erste Gruppe entfielen somit alle Wellenlängen von 1 bis inklusive 3 Minuten Zeitdauer. In die zweite Gruppe gehörten dann alle Wellenlängen von 4 bis inklusive 7, in die dritte alle Wellenlängen von 8 bis 11 Minuten u. s. w. So wurde von 4 zu 4 Minuten fortgeschritten bis zu einer Wellenlänge von 59 Minuten. Man erhielt auf diese Art im ganzen 15 Gruppen von Wellenlängen. Als 16. Gruppe wurden schließlich alle Wellenlängen zusammengefaßt, welche eine Zeitdauer von über 59 Minuten besaßen. Da die Wiedergabe der großen Tabellen in extenso von wenig Wert und Interesse wäre, so sollen in den folgenden Tabellen bloß die Resultate der einzelnen Fälle der Jahre 1905 und 1904 mitgeteilt werden. Die folgenden Zahlen geben also direkt an, wie oft mal ein Zeitintervall zwischen zwei Maxima von bestimmter Länge vorkam.

Tabelle IIIa.
Häufigkeit der einzelnen Periodenlängen 1905.

Periode in Minuten	16. bis 17. Jänner	15. bis 16. März	28. März	9. bis 10. April	11. April	2. Mai	1. Juli	28. bis 29. Sept.	18. bis 19. Nov.	27. Nov.	27. bis 28. Dez.	Anzahl der Fälle 11
unter 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4—7	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	3
8—11	3	0	2	1	2	1	0	0	2	4	9	24
12—15	2	0	0	6	5	4	1	3	7	7	10	42
16—19	2	0	1	6	1	0	1	0	6	1	4	22
20—23	7	0	1	3	3	2	0	3	3	5	6	33
24—27	4	0	0	3	3	1	1	4	3	2	14	38
28—31	9	1	1	3	0	0	2	2	3	2	6	29
32—35	2	1	2	2	0	1	0	1	0	2	1	12
36—39	2	0	1	1	0	0	0	0	1	0	2	7
40—43	3	1	2	1	1	0	0	1	2	1	1	13
44—47	0	0	2	1	0	1	1	3	0	1	2	11
48—51	0	1	2	1	0	1	2	0	2	0	0	9
52—55	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3
56—59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
über 59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle III b.

Häufigkeit der einzelnen Periodenlängen 1904

Periode in Minuten	8.—9. Jänner	12.—13. Jänner	8. März	8.—9. März	14. April	25. September	6.—7. Dezember	Anzahl aller Fälle 7	1904 u. 1905 18
unter 4	1	0	0	0	0	0	0	1	1
4—7	0	2	1	0	0	0	1	4	7
8—11	1	2	2	1	1	0	3	10	34
12—15	2	11	11	1	3	4	6	38	80
16—19	5	3	6	3	5	0	2	24	46
20—23	6	4	3	2	0	3	7	25	58
24—27	11	5	4	5	4	0	9	38	76
28—31	5	4	2	1	1	1	2	16	45
32—35	4	0	1	3	0	2	2	14	26
36—39	1	1	1	1	0	1	1	5	12
40—43	3	0	2	1	1	0	3	10	23
44—47	3	2	0	1	1	1	2	10	21
48—51	3	1	0	0	1	1	1	7	16
52—55	0	0	0	0	1	0	0	1	4
56—59	0	0	0	0	0	0	0	0	0
über 59	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Als weitere Ergänzung zur Untersuchung der Temperaturwellen seien hier auch noch für alle Fälle der Jahre 1904 und 1905 die Amplituden dieser periodischen Schwankungen Fall für Fall mitgeteilt. Was die Auswertung der Thermogramme in Hinsicht auf die Amplitude betrifft, so wurde hier so vorgegangen, daß von jedem Maximum aus sowohl der Unterschied zwischen ihm und dem vorhergehenden Minimum wie auch der Unterschied zum nächstfolgenden Minimum ermittelt und der Unterschied in Zehntelgraden angegeben wurde. Man erhielt so für jedes Maximum zwei Amplituden, eine Amplitude in Bezug auf das vorhergehende Minimum und eine in Bezug auf das nachfolgende Minimum. Wie man schon aus den früher wieder gegebenen Diagrammen ersieht, sind diese zwei Amplituden in den wenigsten Fällen einander gleich, ja sie weichen gewöhnlich stark voneinander ab, so daß sich eine Vermessung nach dieser Art als notwendig herausstellte. Um nun eine bessere Übersicht über die Größe der Amplituden zu erhalten wurden gleichfalls für alle 18 Fälle die einzelnen Amplituden nach Gruppen von 2 zu 2 Zehntelgraden geordnet, und zwar so, daß in die erste Gruppe alle Amplituden bis 0.1° , in die zweite die Amplituden von 0.2° und 0.3° , in die dritte von 0.4° und 0.5° u. s. w. entfielen, wobei bis zu 2.5° fortgeschritten wurde. So ergaben sich 14 Gruppen, wobei wieder in die 14. Gruppe alle Amplituden über 2.5° zusammengefaßt wurden. Die Ergebnisse dieser Verarbeitung sind in den folgenden beiden Tabellen enthalten.

Tabelle IV a.
Häufigkeit der Temperaturamplituden 1905.

Amplitude in Celsiusgrade	16. Jänner	15. bis 16. März	28. März	9. bis 10. April	11. April	2. Mai	1. Juli	28. bis 29. Sept.	18. bis 19. Nov.	27. Nov.	27. bis 28. Dez.	Anzahl der Fälle 11
0·0—0·1	3	2	1	11	5	1	1	7	1	6	33	71
0·2—0·3	6	0	7	10	5	7	4	7	16	17	29	108
0·4—0·5	14	3	5	15	5	4	4	5	14	5	22	96
0·6—0·7	7	2	5	8	1	3	2	2	4	5	16	55
0·8—0·9	5	1	5	5	0	2	1	5	4	4	9	41
1·0—1·1	3	1	3	3	4	4	1	6	6	5	5	41
1·2—1·3	12	1	2	5	0	0	1	1	2	1	3	28
1·4—1·5	1	0	1	2	2	2	0	1	3	2	0	13
1·6—1·7	1	0	1	0	2	1	0	1	3	1	0	10
1·8—1·9	3	1	0	0	1	0	1	0	3	1	0	10
2·0—2·1	1	0	0	1	0	0	0	1	5	2	0	10
2·2—2·3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
2·4—2·5	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	3
über 2·5	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	3

Tabelle IV b.
Häufigkeit der Temperaturamplituden 1904.

Amplitude in Celsiusgrade	8. Jänner	12.—14. Jänner	8. März	8.—9. März	14. April	25. September	6.—7. Dezember	Anzahl der Fälle 7	1904 u. 1905 18
0·0—0·1	13	27	15	10	7	7	11	94	165
0·2—0·3	22	36	11	9	3	6	14	101	209
0·4—0·5	15	37	10	10	6	1	9	88	184
0·6—0·7	12	22	7	4	5	3	7	60	115
0·8—0·9	10	14	8	0	7	1	5	45	86
1·0—1·1	5	9	5	2	1	1	1	24	65
1·2—1·3	1	7	4	1	2	2	2	19	47
1·4—1·5	1	5	0	2	0	0	0	8	21
1·6—1·7	0	2	1	1	1	1	1	7	17
1·8—1·9	0	2	0	0	0	2	0	4	14
2·0—2·1	0	1	0	0	0	1	0	2	12
2·2—2·3	0	1	0	0	0	0	0	1	3
2·4—2·5	0	0	0	0	1	0	0	1	3
über 2·5	0	1	0	0	0	1	0	2	5

Aus der allgemeinen Zusammenstellung der in der Tabelle IIIa und IIIb mitgeteilten Wellenlängen der Einzelfälle der Jahre 1904 und 1905 sehen wir, daß im allgemeinen alle Wellenlängen von 3 bis 59 Minuten vorkommen. Die Wellenlängen sind jedoch auf die einzelnen Gruppen nicht regelmäßig verteilt, sondern wir sehen bestimmte Wellenlängen besonders häufig auftreten. Namentlich sind es die Gruppen von 12—15, 24—27, und 40—43 Minuten, welche mit Ausnahme von wenigen Fällen sowohl gegenüber den früheren Klassen als auch gegenüber den nachfolgenden eine überwiegende Anzahl von Wellenlängen aufweisen. Die Gesetzmäßigkeit in der Verteilung der Wellenlängen auf diese Klassen ist so deutlich bei allen Fällen des Jahres 1904 wie 1905 ausgesprochen, daß man wohl die Wellenlängen der einzelnen Klassen des einen wie des anderen Jahres zu einer Summe vereinigen darf. Der Mittelwert, beziehungsweise die Summe aller 7 Fälle des Jahres 1904 wie die Summe aller 11 Fälle des Jahres 1905 sind als letzte Spalten den Tabellen IIIa und IIIb angeschlossen. Außerdem wurde der Tabelle IIIb am Schlusse noch der Mittelwert, beziehungsweise die Summe aller 18 Fälle der Jahre 1905 und 1904 hinzugefügt. Bei Betrachtung der Mittelwerte beider Jahre zeigt sich in übereinstimmender Weise in beiden Fällen ein regelmäßiges Anwachsen der Häufigkeitszahlen der Wellenlängen von den kleinsten bis zu den Wellenlängen von 12 bis 15 Minuten. Bei dieser Gruppe erreicht die Anzahl der Wellenlängen ein Häufigkeitsmaximum, worauf die Häufigkeitszahlen wieder regelmäßig abnehmen, um dann bei einer Wellenlänge von 24—27 Minuten wieder in übereinstimmender Weise in beiden Jahren das zweite Maximum zu erreichen. Das dritte Maximum der Häufigkeit finden wir dann ebenfalls übereinstimmend bei einer Größenklasse von 40—43 Minuten, worauf dann wieder ein regelmäßiges Abnehmen der Häufigkeit der einzelnen Wellenlängen erfolgt. Diese Gesetzmäßigkeit in den Häufigkeitszahlen der einzelnen Gruppen zeigt sich am deutlichsten in den Mittelwerten, beziehungsweise in der Summe beider Jahre. Betrachten wir die einzelnen Fälle, so zeigt sich schon bei jedem einzelnen Falle diese Gesetzmäßigkeit, welche im Mittelwerte beider Jahre so deutlich ausgesprochen ist. Daß ein Verschieben des Maximums auf eine Nebenklasse nach der einen oder anderen Richtung hin in manchen Fällen vorkommt, ist nicht zu verwundern, wenn man bedenkt, daß das Intervall einer Gruppe bloß vier Minuten beträgt, also leicht bei der geringen Zahl von Wellenlängen bei einem einzelnen Fall infolge von Fehlern beim Abmessen oder infolge von Zufälligkeiten auf Nebenklassen fallen kann. Die Häufigkeitszahlen des ersten und zweiten Maximums sind übrigens in den Einzelfällen beider Jahre ebensodentlich ausgeprägt wie im Mittelwerte der beiden Jahre; das dritte Maximum zeigt sich bei den einzelnen Fällen dagegen nicht so deutlich entwickelt wie im Mittelwerte, was nicht zu verwundern ist, da ja die längeren Wellen überhaupt schon relativ selten sind. Am häufigsten sind somit unter den auftretenden Wellenlängen in ganz roher Schätzung die von 13·5, 25·5 und 41·5 Minuten.

Was nun die Amplituden der Temperaturwellen betrifft, so sehen wir aus den Tabellen IVa und IVb sowohl aus den Einzelfällen wie aus den am Schlusse einer jeden Tabelle angeschlossenen Mittelwerten und namentlich aus dem Mittelwerte, beziehungsweise der Summe beider Jahre, daß alle möglichen Amplituden von 0·1 bis 2·5° auftreten, daß jedoch die Häufigkeit des Auftretens größerer Amplituden mit deren Größe bedeutend abnimmt. Die häufigsten Amplituden sind von der Größenordnung 0·2 bis 0·7° C., größere Amplituden bis zu 1·5° treten auch noch ziemlich häufig auf; noch größere sind jedoch schon selten und zeigen sich nur vereinzelt. Wir finden somit bei den Amplituden ein regelmäßiges Abnehmen der Häufigkeitszahlen von der zweiten Klasse an angefangen bis zu den höchsten hinauf, und zwar ist dieses Abnehmen am deutlichsten in dem Mittelwerte, beziehungsweise der Summe beider Jahre ausgesprochen. Das regelmäßige Abnehmen der Häufigkeit der Amplituden mit ihrer Größe zeigt sich auch in den Einzelfällen sehr gut. Manchmal treten natürlich kleine unwesentliche Maxima auf, die wohl auf Zufälligkeiten zurückgeführt werden müssen und die sich im Mittel aller Fälle aufheben.

II. Temperaturwellen der Jahre 1896—1905.

Nachdem sich bei der Verarbeitung der Temperaturwellen der Jahre 1904 und 1905 ergeben hatte, daß bestimmte Wellenlängen häufiger auftreten als andere, drängte sich die Frage auf, ob diese Gesetzmäßigkeit im Auftreten bestimmter Wellenlängen von allgemeiner Bedeutung sei und ein in der Natur dieser Temperaturwellen liegendes Phänomen sei oder ob man es mit einer Zufälligkeit gerade der in Betracht gezogenen Jahre 1904 und 1905 zu tun habe. Es schien daher wünschenswert, die Temperaturwellen aller vorhandenen Beobachtungsjahre in Bezug auf ihr Verhalten zu untersuchen, zumal da sich herausstellte, daß gerade die Jahre 1904 und 1905 relativ arm an dieser Erscheinung waren und einzelne Jahre vor 1904 das Auftreten dieser Temperaturschwankungen bei Föhn viel häufiger und schöner erkennen lassen. Es lag somit in den früheren Jahren ein großes Material zur Untersuchung dieser Frage vor. Nur so ließ sich ja auch in einwandfreier Weise behaupten, daß das Vorwiegen ganz bestimmter Wellenlängen zur Natur dieser Temperaturschwankungen gehöre und für dieselben charakteristisch sei. Andererseits war auch zu erwarten, daß man auf diese Weise die Länge gerade der häufigsten Wellen mit größtmöglicher Genauigkeit werde bestimmen können. Da der große Thermograph seit Anfang 1896 ununterbrochen funktionierte, lagen zur Untersuchung insgesamt mit 10 Jahre einschließlich 1904 und 1905 vor. Die Vermessung der einzelnen Fälle geschah in ganz analoger Weise wie in den Jahren 1904 und 1905. Es wurden wie früher die genauen Eintrittszeiten eines jeden Maximums bestimmt, aus denen dann die Zeitintervalle, in welchen zwei aufeinanderfolgende Maxima eintraten, sich ergaben. In allen 10 Jahren 1896—1905 kamen insgesamt 134 Fälle zur Untersuchung, wobei jedoch zu bemerken ist, daß von den Jahren 1896—1903 nur alle jene Fälle herausgesucht und bearbeitet wurden, in denen der wellenförmige Gang der Temperatur schön ausgeprägt war, während jene Fälle, in welchen dieser Gang verschwommen zur Darstellung kam, aus der Untersuchung ausgeschlossen wurden. Die Wellenlängen wurden dann gerade so wie in den Jahren 1904 und 1905 in Gruppen von 4 zu 4 Minuten zusammengefaßt und in gleicher Weise wie die der letzten Jahre tabuliert. Aus allen vorgekommenen Fällen eines jeden Jahres wurde sodann der Mittelwert beziehungsweise, die Summe gebildet. Da die Mitteilung der Einzelfälle eines jeden Jahres von wenig Wert und Interesse wäre, sind in folgender Tabelle bloß die Jahresmittel aller Jahre 1896—1905 zusammengestellt, wobei in der zweiten Zeile jedem Jahre die Anzahl der untersuchten Fälle hinzugefügt wurde. In der vorletzten Spalte wurde noch der Tabelle das Gesamtmittel aller 10 Jahre beigefügt.

Häufigkeit der Temperaturwellen von bestimmter Periode.

Bei Betrachtung der einzelnen Jahresmittel ergibt sich nun, daß in jedem Jahre mit großer Regelmäßigkeit und Übereinstimmung die Maxima der Häufigkeit immer bei denselben Gruppen von Wellenlängen auftreten, und zwar liegen diese Häufigkeitsmaxima in Übereinstimmung mit den zuerst untersuchten Jahren bei den Gruppen 12—15, 24—27 und 40—45 Minuten. Die Gesetzmäßigkeit der Verteilung der einzelnen Wellenlängen zeigt sich somit in allen Jahren als dieselbe und nun kann man mit voller Sicherheit behaupten, daß diese Erscheinung mit der ursächlichen Natur der Temperaturwellen im innigen Zusammenhange stehen muß. Das Überwiegen der Wellenlängen dieser drei Gruppen zeigt sich am deutlichsten, wenn man die Häufigkeit des Auftretens in Prozenten aller vermessenen Wellenlängen angibt. Die prozentuellen Werte sind in der letzten Spalte der früheren Tabelle angegeben. Die drei am häufigsten vorkommenden Gruppen bilden zusammen 46·2 Prozent, nehmen somit fast die Hälfte aller vermessenen Wellenlängen ein. Wenn man bedenkt, daß es im ganzen 16 Gruppen gibt und auf nur drei dieser Gruppen fast 50 Prozent aller betrachteten Fälle entfallen, so ist damit am schönsten das Überwiegen dieser drei Gruppen gegenüber den anderen ausgesprochen. Dadurch, daß diese bestimmten Wellenlängen in jedem Jahresmittel und namentlich im allgemeinen Gesamtmittel so prägnant sich hervor-

heben, ist die Möglichkeit geboten, mit größtmöglicher Genauigkeit die Länge der häufigsten Wellen zu ermitteln. Trägt man die Werte des Gesamtmittels aller Jahre in ein Koordinatensystem ein, dessen Abszissenachse die Periode der Wellen, dessen Ordinatenachse die Häufigkeit der Wellengruppen angibt, und legt man dann durch alle so erhaltenen Punkte eine Kurve von möglichst glattem Verlaufe, so kann aus der Lage der Maxima dieser Kurve die Größe der dazugehörigen Abszissenwerte bestimmt werden. Die Größe der diesen Maxima entsprechenden Wellenlängen wird man um so genauer bestimmen können, je größer die Anzahl der Beobachtungen und je exzessiver sich die maximalen Häufigkeitsgruppen gegenüber anderen Gruppen abheben. In unserem Falle ist die Ermittlung der Lage dieser Maxima nicht schwer. Bestimmt man nach dieser Art die Periode der am häufigst vorkommenden Wellen, so erhält man die Werte 14·0, 24·5, 41·5 Minuten.

Tabelle V.

Häufigkeit der Temperaturwellen von bestimmter Periode 1896—1905.

Periode in Minuten	J a h r											Prozentuelle Häufigkeit aller Gruppen
	1896	1897	1898	1899	1900	1901	1902	1903	1904	1905	1896—1905	
	Anzahl der Fälle											
	12	17	11	18	11	16	15	16	7	11	134	
H ä u f i g k e i t												
unter 4	1	0	1		0	0	0	0	1	0	3	0·06
4—7	18	28	13	23	14	5	3	1	4	3	112	2·5
8—11	50	85	51	70	45	26	11	26	10	24	398	8·8
16—15	85	158	90	120	102	99	50	94	38	42	878	19·5
12—19	41	85	47	74	60	54	45	58	24	22	510	11·3
20—23	46	101	58	83	46	59	44	67	25	33	562	12·6
24—27	75	143	82	124	98	108	86	158	38	38	950	21·1
28—31	29	48	31	30	19	23	25	40	16	29	290	6·4
32—35	18	37	17	24	16	20	21	28	14	12	207	4·5
36—39	7	29	14	12	8	11	11	15	5	7	119	2·6
40—43	16	59	21	28	18	22	25	44	10	13	256	5·6
44—47		28	3	6	3	9	20	21	19	11	118	2·6
48—51	4	9	3	5	5	3	6	10	7	9	61	1·3
52—55	1	6	0	2	1	4	3	7	1	3	28	0·6
56—59	1	3	2	0	1	0	0	0	0	0	7	0·1
über 59	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	3	0·06
Summe	399	819	433	603	437	443	350	569	203	246	4502	99·5

Die Gesetzmäßigkeit in dieser Verteilung der Wellenlängen auf die einzelnen Gruppen zeigt sich selbstverständlich auch in allen Einzelfällen der 10 Jahre. Natürlich treten, wie man früher bei den Jahren 1904 und 1905 schon erwähnt hat, manchmal Verschiebungen der maximalen Häufigkeitszahlen auf Nachbargruppen auf. Bei allen 134 Fällen gab es bloß 51 Fälle, in denen das eine oder das andere Maximum nicht mit der Lage der Maxima im allgemeinen Mittel übereinstimmt. Dabei ist jedoch noch zu bemerken, daß die Maxima mit Vorliebe sich nach einer bestimmten Richtung hin verschieben, und

zwar das erste Maximum gegen das folgende Gruppenintervall von 16—19 Minuten, das zweite Maximum gegen die vorhergehende Gruppe von 20—23 Minuten. Es deutet dieses Verhalten natürlich nur an, daß die Häufigkeitsmaxima näher gegen diese Gruppen hin liegen.

Wie schon oben erwähnt, ergibt sich aus der Vermessung aller 134 Fälle der Periode 1896—1905, daß unter den auftretenden Wellenlängen namentlich Wellen von der Periode 14·0, 24·5 und 41·5 Minuten am häufigsten vorkommen. Daraus folgt nun mit voller Sicherheit, daß diese Temperaturwellen das Ergebnis einer Superposition dreier Wellensysteme sind, deren Schwingungsdauer durch die früher genannten Zahlen wiedergegeben sind. Überlagern sich nämlich Wellensysteme von verschiedener Periodenlänge, so werden aufeinanderfolgende Maxima einer solchen Superposition bald näher, bald weiter voneinander abstehen; aber als Werte eines solchen Intervalles von Maximum zu Maximum werden sich jedoch immer noch solche ergeben, die von der wahren Periodenlänge nicht allzu stark abweichen, sondern in bestimmter Folge sich um sie herumgruppieren, so daß man noch mit einiger Genauigkeit ihre wahre Länge ermitteln kann. Gegen diese Methode, die Länge der Perioden auf die angegebene Art zu bestimmen, liegen aber auch Bedenken vor. Die größten Mängel dieses Verfahrens zur Bestimmung der wahren Periodenlängen sind vor allem folgende: Würden diese drei Wellensysteme, wie sie nun in unseren Temperaturwellen einmal gefunden worden sind, sich immer in jedem Falle vorfinden und würde jedes Extrem einer solchen Folge von Wellen sich im allgemeinen Verlauf der Kurve immer deutlich ausgeprägt haben, so müßte man, wenn man stets den Abstand zweier aufeinanderfolgenden Extreme als Länge der Periode auffaßt, nur immer auf eine einzige Periode, nämlich auf die kürzeste, kommen, die in einer solchen zusammengesetzten periodischen Erscheinung vorhanden ist; von den übrigen einer solchen Erscheinung innewohnenden Periodizitäten würde man nie, nicht einmal einen angenäherten Wert ihrer Länge erhalten können. Nur dadurch, daß hier und da die eine oder die andere dieser Perioden im Verlaufe der Erscheinung stark zurücktritt, so daß das entsprechende Extrem sich nicht deutlich entwickeln und somit unbeobachtet bleibt, nur diesem Umstande ist es zu verdanken, daß wir beim Vermessen des Zwischenraumes zweier aufeinanderfolgenden Extreme die Länge aller drei der Erscheinung innewohnenden Perioden bestimmen konnten. Namentlich deshalb, weil die kleinste Periode von 14·0 Minuten in der Erscheinung manchmal sehr undeutlich zum Ausdruck kommt, konnte die zweite Periode von 24·5 Minuten mit nahezu gleicher, ja in einzelnen Fällen sogar mit größerer Häufigkeit gemessen werden als wie die kleine Periode. Die dritte Periode von 41·5 Minuten dagegen, die als Grundperiode wohl in jedem einzelnen Falle immer vorhanden ist, tritt deshalb in der Häufigkeit so stark zurück, weil sie nicht vermessen wird, wenn die zweite Periode deutlich ausgesprochen ist. Freilich wäre auf ihr Vorhandensein aus dem bloßen Anblick der Kurve zu schließen gewesen.

Diese Methode, die Länge der einzelnen der Erscheinung innewohnenden Periodizitäten zu bestimmen, besitzt aber auch noch weitere Mängel, wie zum Beispiel: Nichtberücksichtigung möglicher Verschiebungen der Extreme durch Einfluß sekundärer Komponenten, dann Unmöglichkeit, die Perioden sekundärer kleiner Perioden unabhängig von dem bei der Bestimmung der Hauptperioden begangenen Fehler zu erhalten u. s. w.¹

Bessere Methoden, die Länge von Perioden, die beobachteten Erscheinungen innewohnen auch quantitativ mit größerer Genauigkeit zu bestimmen, hat Buys-Ballot gegeben. Sie besteht im folgenden: Ist man in Besitze einer Reihe von Zahlen, die zuerst ab, dann zunehmen und sich nach n Gliedern periodisch wiederholen, so ordne man diese Zahlen so, daß die $(n + 1)$ Zahl unter die 1., die $(n + 2)$ Zahl unter die 2. u. s. w. zu stehen kommt. Addiert man alle Kolonnen, so besitzt die so erhaltene Zahlenfolge dieselbe Periode wie die ursprüngliche. Ordnet man dagegen die Zahlen so, daß die $n + 2$, oder die $n + 3$ u. s. w. unter die 1. zu stehen kommt und bildet man dann alle Kolonnensummen, so verwischt sich in der erhaltenen Zahlenfolge das Periodizitätsgesetz, und zwar verschwindet die den Zahlen innewohnende Periode um so mehr, je richtiger man die Periode angenommen hat. Besitzt dagegen die Zahlenreihe mehrere Perioden, durch deren Superposition sie entstanden ist, so verwischt sich bei passender Unterordnung der einen

¹ Siehe hierzu: Enzyklopädie der mathem. Wiss., Bd. II, 1, p. 675 ff.

Reihe unter die andere die eine der enthaltenen Perioden um so mehr, je genauer man ihre Länge angenommen hat, während in den Kolonnensummen bloß die anderen Perioden erhalten bleiben.

Diese Sätze kann man natürlich unmittelbar nur auf Zahlenfolgen anwenden und hier geben sie ein gutes Mittel an die Hand, die Perioden, denen eine Zahlenreihe unterworfen ist, mit größter Genauigkeit zu bestimmen. Die Anwendung dieser Sätze von Newander und Buys Ballot auf den vorliegenden Fall, in welchem wir es mit Kurven zu tun haben, ist jedoch nicht schwer. Hätten wir es beispielsweise mit einer einfachen Sinuskurve zu tun, so ist klar, daß, wenn wir eine Kopie dieser Kurve auf Pauspapier gegen die ursprüngliche Kurve um einen bestimmten Betrag verschoben, dann die Superposition dieser beiden Wellen eine dritte Kurve liefert, die auch noch die Periode der Sinuskurve besitzt. Verschieben wir jedoch weiter, so wird einmal ein Punkt kommen, bei welchem die Kurven durch Superposition sich gerade aufheben. Einem Maximum entspricht ein Minimum und umgekehrt. Es tritt dies ein, wenn die Verschiebungsstrecke genau gleich der halben Periodenlänge der Sinuskurve ist. Ähnlich verhält es sich nun bei komplizierten Kurven, die durch Superposition mehrerer Perioden entstanden sind. Sind wir im Besitze einer solchen Kurve und verschieben wir die auf Pauspapier genau kopierte Kurve über die ursprüngliche um eine Strecke, die gleich der halben Länge einer in der Kurve enthaltenen Periode ist, und addieren wir sodann die beiden Kurven, so wird sich in der erhaltenen Kurve die Periode, um deren halbe Länge man die kopierte Kurve gegen die ursprüngliche verschoben hat, um so mehr verwischen, je richtiger man deren halbe Periodenlänge angenommen hat. Hat man diese genau ermittelt, so werden in der erhaltenen Kurve nur mehr die übrig bleibenden Perioden enthalten sein, die man nun auf gleiche Weise aus der Kurve erhalten kann. Durch schrittweise Anwendung dieser Methode wird man alle in einer Kurve enthaltenen Perioden ermitteln können, vorausgesetzt, daß man einen ersten angenäherten Wert der vorhandenen Periodenlängen kennt. Einen solchen zu erhalten, bietet uns die früher angegebene Methode ein gutes Mittel.

Die Anwendung dieser Methode auf unsere Temperaturwellen ergab nun auch ein völlig zufriedenstellendes Resultat. Die mittels der früheren Methode erhaltenen Werte für die Periodenlängen konnte man ja — wenn überhaupt jene Wellen durch Superposition dieser bestimmten Wellenlängen entstanden sind — schon als sehr angenäherte Werte betrachten, da sie ja aus einem großen Beobachtungsmaterial gewonnen waren. Die Kontrolle, ob man mittels der oben erwähnten Verschiebungsmethode dieselben Werte für die Periodenlängen erhält, war aber auf jeden Fall erwünscht. Es soll hier als Beispiel für die Anwendung dieser Methode der Föhnfall vom 12. und 13. Dezember 1897 angeführt werden, dessen Diagramm sich schon unter den auf Seite 4 reproduzierten Fällen vorfindet.

Zunächst wurde das Diagramm auf Pauspapier kopiert, es wurde sodann die Kopie um 7 Minuten gegenüber der Originalkurve verschoben und sodann die beiden Kurven addiert. Dabei zeigte sich, daß die kleinen Maxima, die bei diesem Föhnfall deutlich ausgeprägt sind, verschwinden, so daß in der neuen Kurve nur mehr die zweite und dritte Periode vorhanden ist. Die so gewonnene Superpositionskurve für den Föhnfall vom 12. und 13. Dezember 1897 ist als erste Kurve I in folgendem Diagramm wiedergegeben.

Kopiert man nun diese Kurve I wieder auf Pauspapier und verschiebt sie sodann um $12\frac{1}{4}$ Minuten über die Kurve I, so erhält man durch abermalige Superposition die Kurve II. Durch diesen zweiten Schritt wurde aus der Kurve I die Periode von 24·5 Minuten eliminiert, so daß nach unseren früheren Resultaten die Kurve II bloß die Periode von 41·5 Minuten enthalten sollte. Dies zeigt auch die Kurve II in schöner Weise. Verschiebt man eine Kopie dieser Kurve um $20\frac{3}{4}$ Minuten, so liefert die Superposition beider Kurven die Kurve III, die sich nicht mehr als regelmäßige Wellenlinie ergibt. Wir erhalten somit mittels dieser Verschiebungsmethode ebenfalls bloß drei Perioden. Eine Welle von größerer Periode als 41·5 Minuten, die eventuell nach der früheren Methode hätte übersehen werden können, gibt es, wie die Kurve III lehrt, nicht. Die Unregelmäßigkeiten in der Kurve III haben mit dem Phänomen dieser Temperaturwellen nichts zu tun und weisen vielleicht nur auf zufällige Verstärkungen der Föhnströmung selbst hin.

Wir finden somit, daß übereinstimmend nach der einen wie nach der anderen Methode, die Temperaturwellen, welche in Innsbruck bei Föhn so häufig auftreten, als eine Superposition dreier Wellen anzusehen sind, deren Perioden 41·5, 24·5, 14·0 Minuten betragen. Bilden wir die Verhältnisse 24·5:41·5



Fig. 7.

und 14·0:24·5, so erhalten wir im ersten Falle 0·59 im zweiten 0·57. Die Verhältnisse zweier Nachbarperioden sind somit angenähert gleich und die kleinere Periode ist ungefähr halb so groß wie die nächst höhere.¹

¹ Wie schon erwähnt wurden in Innsbruck im Jahre 1905 auch die Regenfälle auf die Dauer und auf ihre Intensität in kürzeren Zeitintervallen untersucht. Da man bei diesen Regenfällen zu ebensolchen Wellen kam, so liegt es nahe, die Perioden der einzelnen Regenwellen mit den Periodenlängen, die man bei den Temperaturwellen erhielt, zu vergleichen. Die kürzeste Periode, die bei den Regenwellen noch mit einiger Genauigkeit ermittelt werden konnte, beträgt nun etwas über 40 Minuten. Kürzere Wellenlängen konnten deshalb nicht gefunden werden, weil die Regenintensität bloß von 10 zu 10 Minuten bestimmt werden konnte. Es ist aber jedenfalls bemerkenswert, daß die größte Periodenlänge der Temperaturwellen mit dieser noch nicht genauer ermittelten Periode der Regenintensitätsschwankungen übereinzustimmen scheint. Diese Periode der Regenschwankungen zeigt sich vor allem bei böigem Wetter, kommt jedoch auch bei länger anhaltendem Landregen zum Ausdruck. Vielleicht wird es mir möglich sein, bei anderer Gelegenheit auf diese Erscheinung des näheren einzugehen.

III. Die wahrscheinliche Ursache dieser Temperaturschwankungen.

Die Tatsache, daß sich die besprochenen Temperaturwellen als eine Superposition bestimmter einfacher Wellenzüge erwiesen haben, ist zweifellos das interessanteste Ergebnis. Es ist ein zwingender Grund, als Ursache dieser Temperaturschwankungen wellenförmige Bewegungen im Innertale anzunehmen, denn ohne solche Bewegungen wäre ein periodischer Wechsel verschieden temperierter Luft nicht möglich.

Weiter ist in Betracht zu ziehen, daß diese Temperaturwellen in Innsbruck dann auftreten, wenn die untersten Schichten des Tales mit kalter Luft erfüllt sind, während in der Höhe (wenigstens über Innsbruck) die warme Südströmung herrscht. Es ist also nicht unwahrscheinlich, daß auch diese Tatsache mit der besprochenen Erscheinung in ursächlichem Zusammenhange steht.

Wenn nun die Temperaturschwankungen auf Wellenbewegungen der Luftmassen im Innertale zurückzuführen sind, dann ist vor allem die Frage zu beantworten: sind unter diesen Wellenbewegungen fortschreitende Luftwogen zu verstehen oder haben wir dieselben als stehende Luftwellen aufzufassen? Im ersteren Falle hätten wir eine Analogie zu den Windwogen größerer Wasserflächen vor uns, im letzteren Falle würden wir vielleicht an eine Analogie zu jenen periodischen Wasserspiegelschwankungen — die »Seiches« — zu denken haben, die Forel am Genfersee nachgewiesen und untersucht hat und die vielfach auch an anderen Seen beobachtet wurden.

Es gerät bei solchen Seiches die ganze Wassermasse eines Sees in eine regelmäßig oszillierende Bewegung, deren Schwingungsdauer bloß von den Dimensionen des Wasserbeckens abhängig ist. Der Wasserspiegel hebt sich an einem bestimmten Orte langsam über das normale Niveau bis zu einer gewissen Höhe, senkt sich hierauf um den gleichen Betrag unter dasselbe und dieses Auf- und Abschwanken wiederholt sich periodisch.

Forel konnte auch nachweisen, daß die Anwendung der Gesetze stehender Wellen in einem Wasserbecken von bestimmter Länge und Tiefe auf solche Seiches erlaubt ist.

Was nun zunächst die fortschreitenden Luftwogen anbelangt, so hat H. v. Helmholtz in seiner berühmten Abhandlung »Über atmosphärische Bewegungen«¹ gezeigt, daß, wenn in der freien Atmosphäre ein Luftstrom über eine darunterliegende Luftschicht von anderer Dichte hinwegstreicht, an der Grenzfläche der beiden Luftschichten die Bedingung für das Entstehen und für die regelmäßige Fortpflanzung von Wellen gegeben ist, gerade so und aus denselben Gründen, aus denen eine Grenzfläche zwischen Wasser und Luft bei gegebener Windgeschwindigkeit sich in eine regelmäßige Wellenfläche verwandelt.

Daß solche Wellensysteme an den Grenzflächen zweier verschieden temperierter Luftmassen auch wirklich in der Atmosphäre häufig auftreten, hat schon Helmholtz angenommen und insbesondere durch die wissenschaftlichen Ballonfahrten ist durch die Beobachtung die Existenz solcher Wogen zu wiederholten Malen erwiesen worden. In der Regel bleiben uns diese Luftwogen unsichtbar, sie werden uns nur in ganz speziellen Fällen, die man wohl als Ausnahmefälle betrachten muß, und unter gewissen Bedingungen sichtbar. Es tritt dies zum Beispiel ein, wenn die unteren Luftschichten mit Wasserdampf nahezu oder ganz gesättigt sind und die Erhebung der Luftmassen in den Wellenbergen zur Wolkenbildung Anlaß gibt, so daß wir an allen Stellen der Grenzfläche, wo Wellenberge sich vorfinden, parallele Wolkenbänke, die sogenannten Wogenwolken, erhalten.

Die Dimensionen solcher Luftwogen sind wegen der geringen Dichteunterschiede, die bei zwei aneinander grenzenden Luftschichten vorkommen können, viel beträchtlichere als bei Wasserwogen. Hann führt in seinem Lehrbuche² folgendes Beispiel von der bayerischen Ballonfahrt am 7. November

¹ Sitzb. der königl. preuß. Akad. der Wiss., Jahrg. 1888 und 1889. Siehe auch Meteorol. Zeitschr. Nr. 23, 1888, p. 329 ff., und Nr. 25, 1890, p. 81 ff.

² Hann, Lehrb. der Meteorologie, 2. Aufl., p. 206.

1896 an. Die unteren Luftschichten hatten eine Temperatur von 2.7° C. und 400 *m* darüber befand sich eine warme Luftschicht von 9.2° C., welche mit einer Geschwindigkeit von 12.5 *m/sec.* über die kalte hinwegstrich. An der Grenzfläche beider Luftmassen zeigte sich nun eine Reihe von Wogenwolken, deren 15 auf $7\frac{1}{2}$ *km* entfielen. Die Wellenlänge der Luftwogen ergab sich hieraus auf ungefähr 500 *m*. Dies stimmt auch überein mit einem Beispiel, das Helmholtz gerechnet hat. Unter anderen Verhältnissen kommen aber auch viel größere Wellenlängen vor. Nach den Potsdamer Wolkenmessungen¹ schwankt die Wellenlänge der Wogenwolken zwischen 50 und 2040 *m*, ihre Höhe über dem Boden zwischen 500 und 10.400 *m*; eine Wellenlänge von 450 *m* scheint jedoch in einer Höhe von 3000—6000 *m* bevorzugt zu sein. Verschiedenen Höhenstufen entsprechen aber nach den obigen Messungen auch verschiedene Längen der Wogen; so betrug unter 2000 *m* die mittlere Wellenlänge 218 *m*. Die Höhenstufe 2000—8000 *m* zeigte eine Wellenlänge von 450 *m*; über 9000 *m* besaßen die Wogensysteme schon eine Wellenlänge von 1016 *m*. Aus diesen Zahlen ersieht man, wie verschieden die Wellenlängen solcher fortschreitender Wogensysteme sein können.

Jedenfalls kommen nun solche Luftwogen in der Atmosphäre vor und sie entsprechen nach Ursache und Schwingungsart vollständig den Wasserwogen.

Es wäre nur sehr interessant, wenn diese Analogie zwischen kalter stagnierender Luft und Wasser weiter gehen würde und wenn es bei den in Alpentälern häufig auftretenden Kaltluftseen Analoga zu den früher erwähnten Seiches gebe. Diese Luftseiches würden dann wie die Seiches, die in Seen auftreten, stehenden Wellen der unteren stagnierenden Luftmassen entsprechen und man würde neben den fortschreitenden Helmholtz'schen Luftwogen, wie sie an der Grenzfläche zweier verschieden temperierter Luftschichten auftreten, auch von stehenden Wellen kalter Luftseen sprechen müssen. Bis jetzt ist von derartigen Erscheinungen nichts bekannt geworden. Theoretisch muß aber die Möglichkeit solcher Luftseiches zugegeben werden. Durch gewisse Bodenformationen können bestimmte Luftmassen von ihrer Umgebung fast vollständig abgeschlossen sein. Bilden sich nun in solchen Talbecken unter bestimmten Witterungsverhältnissen infolge Ansammlung kalter Luft kalte stagnierende Luftseen, so sind auch hier, wenn dieselben nach oben hin durch wärmere Schichten abgegrenzt sind, die Bedingungen zur Bildung von stehenden Wellen gegeben. Ihre Entstehung kann dann eine sehr verschiedene Ursache haben. Sie können durch Reflexion fortschreitender Helmholtz'scher Wogen entstehen, also auch durch einen darüber wehenden Luftstrom angeregt werden oder aber es kann irgend eine Störung an dem einen Ende des Kaltluftbeckens zur Schwingung der abgegrenzten Luftmasse Veranlassung geben. Die Schwingungen aber werden mit den oben erwähnten Helmholtz'schen Luftwogen nichts gemein haben, sie werden, wie die Schwingungen der Wassermasse eines Sees ganz von den Dimensionen des Kaltluftsees abhängen.

Helmholtz'sche Luftwogen wie derartige hypothetische Luftseiches setzen eine untere kalte stagnierende Luftschicht voraus. Da nun beim Auftreten der Temperaturschwankungen wirklich das Tal mit kalter Luft erfüllt ist, so wäre diese Bedingung für das Zustandekommen sowohl von fortschreitenden Helmholtz'schen Luftwogen wie auch von stehenden Luftseiches (falls solche überhaupt existieren) tatsächlich vorhanden; es kommen somit diese beiden Wellenarten ernstlich in Betracht.

Im ersteren Falle (fortschreitende Wellen) würden die Temperaturschwankungen im Sinne der einen Erklärungsmöglichkeit, auf welche Ficker hingewiesen hat, durch das Vorüberziehen von Wellenbergen und Wellentälern hervorgerufen sein. Es würde allemal dann die Temperatur ansteigen, wenn ein Wellental über Innsbruck hinwegginge, wenn also die warme Föhnströmung weiter hinabreicht.

Im zweiten Falle (stehende Wellen) würde man sich im Sinne der anderen Erklärungsmöglichkeit den Vorgang etwa so vorstellen können, daß bei dem periodischen Auf- und Abschwanken der kalten

¹ R. Sührling, Ber. über die Ergeb. der deutschen Wolkenbeobachtungen im internationalen Wolkenjahre. Meteor. Zeitschr. Bd. 39, 1904, p. 366.

Luft und dem damit verbundenen periodischen Wechsel im Druckgefälle längs des Talbodens das eine Mal die warme Föhnströmung, das andere Mal die kalte Talluft die Oberhand bekäme. Wir hätten es bei diesen Temperaturschwankungen mit demselben Vorgange im kleinen und im periodischen Wechsel zu tun, der im großen bei den Föhnpausen tatsächlich vorhanden ist.

Von vornherein wäre somit die Möglichkeit gegeben, die Temperaturschwankungen auf fortschreitende wie auf stehende Wellen zurückzuführen. Der Charakter der Schwingung und damit auch der Charakter der Temperaturschwankungen müßte aber in beiden Fällen ein verschiedener sein.

Die Länge der Helmholtz'schen Luftwogen ist von den Dichtigkeits- und Bewegungsverhältnissen der übereinanderlagernden Luftschichten abhängig, sie sind dem Dichtigkeitsunterschiede verkehrt, dem Quadrate der relativen Geschwindigkeit der Luftschichten, also der Intensität des Windes, direkt proportional. Wenn Helmholtz'sche Wogen auftreten, werden sie die verschiedensten Wellenlängen aufweisen je nach den vorhandenen Temperatur- und Windverhältnissen.

Ganz im Gegenteil ist die Schwingungszeit der Seiches von den Temperatur- und Windverhältnissen unabhängig. Es tritt bei ihnen eine Grundschwingung mit den entsprechenden Oberschwingungen auf, und die Grundschwingung einer in einem trogähnlichen Becken abgegrenzten Flüssigkeit ist gegeben durch die unveränderliche Länge des Troges und die Tiefe der Flüssigkeit.

Merian-Von der Mühl¹ hat die Bewegung einer Flüssigkeit in Gefäßen untersucht und hat die Dauer einer einfachen Schwingung als Funktion der Länge l und der Tiefe h des Beckens ermittelt. Die Oberfläche einer solchen in Schwingungen versetzten Flüssigkeit vollführt eine Bewegung, deren Gestalt durch den Ausdruck:

$$z = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos k_n t \cos \frac{n\pi}{l} x$$

gegeben ist. Dabei bedeuten A_n konstante Größen, die Amplituden der einzelnen Schwingungen, und k_n ist definiert durch den Ausdruck:

$$k_n^2 = \frac{n\pi g e^{\frac{n\pi h}{l}} - e^{-\frac{n\pi h}{l}}}{e^{\frac{n\pi h}{l}} + e^{-\frac{n\pi h}{l}}}$$

oder genähert für den Spezialfall, wenn $\frac{n\pi h}{l}$ klein ist

$$k_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{gh}.$$

Für diesen Spezialfall wird somit

$$z = A_1 \cos \frac{\pi x}{l} \cos \left(\frac{\pi}{l} \sqrt{gh} \right) t + A_2 \cos \frac{2\pi x}{l} \cos \left(\frac{2\pi}{l} \sqrt{gh} \right) t + \dots$$

Man sieht hieraus, daß die Oberfläche der Flüssigkeit eine Bewegung vollführt, die als Superposition einer Reihe einfacher Schwingungen erscheint. Die Gleichung für z stellt zugleich den allgemeinen Typus einer stehenden Welle dar. Alle Teilchen der Oberfläche der Flüssigkeit gehen gleichzeitig durch ihre Gleichgewichtslage, erreichen gleichzeitig ihre größten Ausweichungen und befinden sich stets gleichzeitig im gleichen Schwingungszustande. Wir sehen aber auch, daß die Schwingungsweite, die Amplitude der Schwingung, nicht für jede Stelle der Oberfläche gleich ist, sie variiert von Ort zu Ort des

¹ J. R. Merian. Über die Bewegung von Flüssigkeiten in Gefäßen. Abhandlung, Basel 1828, siehe auch J. R. Merian- M. Von der Mühl. Mathem. Annalen, Leipzig, 1885, Bd. XXVII, p. 575 ff.

Beckens. Es gibt Punkte, bei welchen überhaupt keine vertikale Bewegung vorhanden ist. Für diese Punkte muß $\cos \frac{n\pi x}{a} = 0$ sein, deren Auflösung $x = \frac{(2n+1)a}{2}$ liefert. In der Mitte des Beckens, dann eventuell im ersten und dritten Viertel seiner Länge u. s. w. besitzen die Teilchen des schwingenden Mediums keine vertikale Bewegung, sie verharren in ihrer Gleichgewichtslage in Ruhe oder besitzen bloß horizontale Bewegungen. Es sind die Knotenpunkte. Andere Teilchen und gerade diejenigen, die in der Mitte zwischen zwei Knotenpunkten liegen, besitzen ihre größten Ausweichungen aus der Gleichgewichtslage, und zwar schwanken sie um genau denselben Betrag einmal unter, das andere Mal über das Gleichgewichtsniveau. Hierin liegt der wesentliche Unterschied gegen die fortschreitenden Wellen; bei diesen gibt es keine Knotenpunkte, alle Teilchen machen die vollständige Schwingungsbewegung mit, nur jedes in einem anderen Zeitpunkte.

Aus der früheren Gleichung folgt, daß nach der Zeit $t = \frac{\pi}{k_n}$ alle Teilchen wieder genau dieselbe Lage wie vor dieser Zeit, jedoch mit entgegengesetzten Zeichen besitzen. Es vergeht somit die Zeit $2t$, bis jedes Teilchen sich wieder in derselben Phase befindet. Es ist somit $\frac{\pi}{k_n}$ die halbe Schwingungsdauer der Bewegung. Sie ist gegeben durch die Gleichung:

$$t = \sqrt{\frac{\pi l}{ng}} \left\{ \frac{e^{\frac{n\pi h}{l}} + e^{-\frac{n\pi h}{l}}}{e^{\frac{n\pi h}{l}} - e^{-\frac{n\pi h}{l}}} \right\}^{1/2}.$$

Die Grundschiwingung der Bewegung erhalten wir, wenn wir $n = 1$ setzen. Diese Schwingung besitzt nur einen Knotenpunkt in der Mitte des Beckens und ihre größten Ausweichungen sind an den Enden desselben. Ihre Schwingungsdauer ist gegeben durch:

$$t_1 = \sqrt{\frac{\pi l}{g}} \left\{ \frac{e^{\frac{\pi h}{l}} + e^{-\frac{\pi h}{l}}}{e^{\frac{\pi h}{l}} - e^{-\frac{\pi h}{l}}} \right\}^{1/2}.$$

Die Schwingungsdauer ist unabhängig von der Amplitude der Schwingung; sie wird größer, je länger das Becken ist, desto kleiner je tiefer die Tiefe des schwingenden Mediums ist. Ist das Verhältnis $\frac{h}{l}$ klein, erhalten wir durch Umformung und Reihenentwicklung für die Schwingungsdauer den Ausdruck

$$t_1 = \frac{l}{\sqrt{gh}} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\pi h}{l} \right)^2 \right\}.$$

Ist jedoch $\frac{h}{l}$ so klein, daß wir auch $\left(\frac{h}{l} \right)^2$ vernachlässigen können, so erhalten wir für die Schwingungsdauer als ersten angenäherten Wert

$$t_1 = \frac{l}{\sqrt{gh}}.$$

Außer dieser einknotigen Grundschiwingung können noch die Oberschwingungen auftreten, deren Schwingungsdauer wir aus der früheren allgemeinen Form erhalten, wenn wir $n = 2, 3$ u. s. w. setzen.

Forel hat diese Gesetze für die Schwingungen einer begrenzten Wassermasse bei den Seespiegelschwankungen in Anwendung gebracht und gezeigt, daß die erzielten Resultate in guter Übereinstimmung mit der Erfahrung stehen. Die gleichen Formeln wären auch auf unsere Luftseiches in Anwendung

zu bringen. Während wir uns jedoch bei Wasserspiegelschwankungen an der Grenzfläche der beiden Medien selbst befinden, sind wir bei unseren kalten Luftseen gezwungen, unsere Beobachtungen am Grunde desselben auszuführen. Setzen wir also einmal voraus, es bestände irgendwie die Möglichkeit, diese stehenden Luftschwingungen am Boden des Tales messend zu verfolgen,¹ so würde der Charakter der stehenden Wellen im Talbecken selbst an einem bestimmten Orte der folgende sein: Die Höhe der kalten stagnierenden Luft über dem Beobachtungsort wird periodisch bald länger, bald kürzer, und zwar muß die Periode dieser Schwingung identisch sein mit der Schwingungsdauer der ganzen stehenden Welle, ist somit gegeben durch die Formel für λ . Sind im Talbecken zwei Wellen (zum Beispiel die ein- und zweiknotige Welle) vorhanden, so werden sich diese superponieren und über dem betreffenden Beobachtungsorte wird auch die Oberfläche die Bewegung mitmachen, die sich durch Superposition beider Wellen ergibt. Charakteristisch für stehende Wellen ist weiters der Umstand, daß diese Schwingungen nicht über jedem Punkte des Talbeckens mit gleicher Intensität auftreten könnten. Befinden wir uns zufällig an einer solchen Stelle des Talbeckens, an welcher gerade eine der vorhandenen Schwingungen ihren Knotenpunkt besitzt, so bleibt für diesen Ort jene Schwingung ohne Effekt; es verhält sich gerade so, als ob sie nicht vorhanden wäre. Wir können diese Schwingung nur dort finden, wo sie einen Schwingungsbauch besitzt, und sie tritt um so mehr zurück, je mehr wir uns einem Knotenpunkte nähern.

Anders verhält es sich bei fortschreitenden Wellen. An jeder Stelle des Beckens müßten die Wellenlängen, die dort vorhanden sind, auftreten, da ja die fortschreitende Welle über alle Punkte des Beckens hinzieht. Bei fortschreitenden Wellen ist kein Punkt der Grenzfläche bevorzugt; jeder Punkt muß, wenn auch zu ungleichen Zeiten die gleiche Bewegung vollziehen.

Die Frage, ob die besprochenen Temperaturschwankungen auf fortschreitende Luftwogen oder auf stehende Luftseiches zurückzuführen sind, ist nun leicht zu beantworten.

Während bei fortschreitenden Wellen alle möglichen Perioden auftreten müßten, treten bei stehenden Wellen bestimmte Wellenlängen auf, deren Größe von den Dimensionen des Talbeckens abhängen. Die einzelnen Wellen haben eine bestimmte Schwingungsdauer, die zueinander in einem gegebenen Verhältnisse stehen. Die Schwingungsdauer der einzelnen auftretenden Wellen ist allein abhängig von der Troglänge und der Höhe des stagnierenden Kaltluftsees, jedoch unabhängig von der Amplitude der Schwingung und unabhängig von den Dichteunterschieden der Luftschichten. Die Amplitude der Schwingung ist am bedeutendsten in der Mitte zwischen zwei Knotenpunkten und wird sukzessive, kleiner je näher man zu einem Knotenpunkte hinrückt. Befindet man sich zufällig in einem Knotenpunkte, so kann die betreffende Wellenart nicht beobachtet werden. Im allgemeinen werden mehrere Wellenlängen auftreten und dann ergibt sich die tatsächlich beobachtete durch Superposition aller vorhandenen einfacheren Wellen.

Da wir nun bei den Temperaturschwankungen, welche gewiß auf wellenförmige Bewegungen zurückzuführen sind, fanden, daß sie durch Superposition dreier Wellenzüge von ganz bestimmter Periode entstehen, kann somit nur mehr an einen Zusammenhang mit stehenden Wellen gedacht werden.

Bei den Seiches des Genfersees konnte Forel zeigen, daß neben der Grundschwingung hauptsächlich die erste und zweite Oktav vorhanden sind. Theoretisch sollten dann die Periodenlängen im Ver-

hältnisse $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{4}$ stehen. Für den Genfersee gibt Forel Verhältniszahlen an, die in der Tat sehr nahe mit der Theorie übereinstimmen. Für longitudinale Seiches am Genfersee findet er als Schwingungsdauer der Grundschwingung 73·5 Minuten, als Schwingungsdauer der ersten Oberschwingung 35·5 Minuten, somit als Verhältniszahl $35·5 : 73·5 = 0·48$, für transversale Seiches (zwischen Morges und Evian) die entsprechenden Werte 10·3 Minuten und 5·3 Minuten. Ihre Verhältniszahl ist somit hier 0·51. Für andere

¹ Wenn die Temperaturschwankungen wirklich auf sie zurückzuführen sein sollten, würden wir sie eben mittelbar durch ihren Effekt, durch die besprochenen lokal auftretenden Temperaturwellen messen.

Seen ist die Übereinstimmung eine geringere, wie es ja auch von vornherein zu erwarten ist, da ja bei einem See die Voraussetzungen der Theorie, daß man es mit einem Troge von überall gleicher Breite und Tiefe zu tun habe, wenig streng erfüllt sind. Für andere Seen fand Forel folgende Verhältniszahlen:

$$\begin{aligned} \text{Bodensee: } & 28:1: 55.8 = 0.51 \\ \text{See von Neuchâtel: } & 25.5: 46.5 = 0.55? \\ \text{Zürichersee: } & 23.8: 45.6 = 0.52 \\ \text{See von George: } & 72.0: 131.0 = 0.55. \end{aligned}$$

Für unsere stehenden Luftschwingungen ergibt sich das Verhältnis der Periodenlängen $24.5:41.5 = 0.59$ und $14.0:24.5 = 0.57$; wir hätten also vermutlich an eine Grundschwingung (Periode 41.5 Minuten), an eine erste Oberschwingung (24.5 Minuten) und an eine dritte Oberschwingung (14.0 Minuten) zu denken.

Wir könnten noch den Versuch machen, aus dem Werte von zweitem, (der Dauer der Grundschwingung) auf die Dimensionen der schwingenden Luftschicht zu schließen. Da

$$t_1 = 41.5 : 2 = 20.75 \text{ Minuten} = 1245 \text{ Sekunden ist,}$$

ergibt sich aus der Gleichung

$$t_1 = \frac{l}{\sqrt{gh}} \text{ für } \frac{l^2}{h} \text{ der Wert } 15.2 \cdot 10^6,$$

wenn als Längeneinheit das Meter zu Grunde gelegt wird. Es fragt sich: Wird diese Gleichung durch zusammengehörige Werte von h und l befriedigt, die mit den tatsächlichen Verhältnissen einigermaßen stimmen? Jedenfalls muß wohl Innsbruck gegen das Ende des in Betracht kommenden Kaltluftsees hin liegen. Tatsächlich befindet sich unmittelbar bei Innsbruck, zirka 10 Kilometer westlich, zwischen dem Dorfe Zirl und Kematen die bedeutendste Verengung im ganzen Verlaufe des Tales, welche das Oberinntal und Unterinntal trennt.

Es schieben sich von der einen Seite die Martinswand, auf der anderen Seite die Ausläufer der Zentralkette stark in die Talmitte vor und bilden so eine merkliche Verengung des Tales. Es kommt also von vornherein nur das Unterinntal in Betracht, das sich tatsächlich wie ein Trog in ziemlich derselben Richtung ohne wesentliche Verengung von Innsbruck bis zur Kufsteiner-Klause (Innsbruck—Kufstein zirka 70 km) erstreckt. Es könnte also entweder das ganze Unterinntal in Betracht kommen, es wäre aber auch gerade denkbar, daß irgendwie durch das unweit Jenbach mündende Zillertal (zirka 35 km östlich von Innsbruck) das schwingende Luftgebiet eingeschränkt würde. An andere Grenzen des Kaltluftsees wäre nicht zu denken.

Auch für die Höhe dieses letzteren wird man in der Wahl ziemlich beschränkt sein. Die kalte stagnierende Luftschicht erfüllt das Inntal und erstreckt sich bis zur Höhe des Mittelgebirges. Das Mittelgebirge hat aber bei Innsbruck eine Höhe von zirka 300 m über der Talsohle; weiter östlich ist die Höhendifferenz etwas größer.

Wir wollen uns nun eine kleine Übersicht der zugehörigen Werte von h und l , die der Bedingung $l^2 = 15.2 \cdot 10^6 h$ genügen, verschaffen. Wir finden:

für $h =$	100	250	300	350	400	1000 m
ist $l =$	39	62	68	73	78	123 km.

Wir würden also zum Beispiel für eine Troglänge von 78 km und eine Höhe der schwingenden Luftschicht von 400 m eine Grundschwingung von 41.5 Minuten Dauer erhalten. Es soll damit nur gezeigt werden, daß die Annahme stehender Luftschwingungen im Unterinntale wenigstens nicht im Widerspruche mit den beobachteten Werten steht. Mehr soll damit nicht behauptet werden; denn es ist festzuhalten, daß die Ableitung der für Seiches geltenden Formel, streng genommen, einen parallelepipedischen Trog voraussetzt, und daß außerdem eine inkompressible Flüssigkeit vorausgesetzt wird, so daß die Anwendung der Formel auf stehende Luftwellen nur genähert gelten kann.

Als bewiesen darf also wohl nur angesehen werden, daß die vor Beginn des Föhns oder in Föhnpausen auftretenden wellenförmigen Temperaturschwankungen in Innsbruck auf stehende Luftschwingungen zurückzuführen sind und daß es also auch bei den in Talbecken vorhandenen Kaltluftseen ein Analogon zu den Seiches der Wasserwellen gibt. Ob es sich in dem besprochenen speziellen Falle um eine Schwingung der ganzen Luftmasse des Unterinntales handelt, bleibe dahingestellt.

IV. Zusammenfassung der Resultate.

Als Resultat der vorstehenden Untersuchung ergibt sich folgendes:

1. In Innsbruck treten vor Beginn des Föhns oder bei Föhnpausen wellenförmige Temperaturschwankungen auf. Sie treten dann auf, wenn die unteren Schichten des Tales mit kalter stagnierender Luft erfüllt sind, während in der Höhe (wenigstens über Innsbruck) die warme Südströmung herrscht. In den 10 Jahren von 1896 bis 1905, während welcher ein großer Thermograph Richard in Innsbruck funktionierte, kam diese Erscheinung durchschnittlich 13·4 mal im Jahre vor, wobei während eines Falles durchschnittlich 33·4 Wellen auftraten.

2. Bei solchen Temperaturwellen haben je zwei aufeinanderfolgende Temperaturmaxima einen ungleichen Zeitabstand: von 3 Minuten bis zu etwa 1 Stunde. Ordnet man die Wellen nach diesem Abstände der Maxima in Gruppen, so zeigt sich, daß übereinstimmend in allen 10 Jahren 3 bestimmte Perioden bedeutend vorwiegen: 14·0, 24·5 und 41·5 Minuten.

3. Auch auf graphischem Wege läßt sich zeigen, daß die Temperaturwellen durch Superposition dreier Wellen von 14·0, 24·5 und 41·5 Minuten Schwingungsdauer entstehen.

4. Diese Temperaturwellen sind jedenfalls auf wellenförmige Bewegungen der Luft im Inntale zurückzuführen.

5. Aus dem Auftreten bestimmter Wellenlängen läßt sich schließen, daß diese wellenförmigen Bewegungen der Luft nicht durch Helmholtz'sche Luftwogen entstehen (dann müßte ihre Wellenlänge variabel sein), sondern durch stehende Luftwellen eine Grundschiwingung mit ihren Overtönen. Es gibt somit ein Analogon zu den Seiches, welche insbesondere von Forel am Genfersee beobachtet wurden, auch in den Kaltluftseen der Alpentäler.

6. Die Temperaturschwankungen in Innsbruck sind vermutlich auf Seiches der kalten Luftschichten im Unterinntale zurückzuführen und sie entstehen wahrscheinlich so, daß bei dem periodischen Auf- und Abschwanken der kalten Luft und dem damit verbundenen periodischen Wechsel im Druckgefälle längs des Talbodens das eine Mal die warme Föhnströmung, das andere Mal die kalte Talluft die Oberhand bekommt.

Digitized by the Harvard University, Ernst Mayr Library, Department of Organism and Systematics, Cambridge, Mass.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Denkschriften der Akademie der Wissenschaften.Math.Natw.Kl. Frueher: Denkschr.der Kaiserlichen Akad. der Wissenschaften. Fortgesetzt: Denkschr.oest.Akad.Wiss.Mathem.Naturw.Klasse.](#)

Jahr/Year: 1907

Band/Volume: [80](#)

Autor(en)/Author(s): Defant Albert Josef Maria

Artikel/Article: [Innsbrucker Föhnstudien II. \(Mit 7 Textfiguren\). 107-130](#)