

Heft 3

München, September 1978

W. CASPARY – A. GEIGER

Untersuchungen
zur Leistungsfähigkeit
elektronischer
Neigungsmesser

SCHRIFTENREIHE

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München



Heft 3

München, September 1978

W. CASPARY – A. GEIGER

Untersuchungen
zur Leistungsfähigkeit
elektronischer
Neigungsmesser

SCHRIFTENREIHE

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München



Verantwortlich für die Herausgabe: Prof. Dr. G. Neugebauer
Redaktionelle Bearbeitung: Dipl.-Ing. J. Peipe

Bezugsnachweis:
Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München
Studiengang Vermessungswesen
Werner-Heisenberg-Weg 39
8014 Neubiberg

Inhaltsverzeichnis

| | <u>Seite</u> |
|---|--------------|
| 1. EINLEITUNG | 1 |
| 2. RÖHRENLIBELLEN | 3 |
| 2.1 Krümmungsfelder | 3 |
| 2.2 Äußere Fehlereinflüsse | 7 |
| 2.2.1. Fehler wegen Temperaturänderungen | 7 |
| 2.2.2. Fehler wegen Temperaturgefälle | 7 |
| 2.2.3. Verbindung mit dem Instrument | 8 |
| 2.3. Das Schwingungsverhalten | 9 |
| 2.4. Zusammenfassung | 9 |
| 3. ELEKTRONISCHE NEIGUNGSMESSER | 11 |
| 3.1 Elektrolytlibellen | 11 |
| 3.1.1. Die "Elektronische Wasserwaage" EWB von SCHMIDT | 11 |
| 3.1.2. Das TM-1 "Biaxial Tiltmeter" von KINEMATRICS | 13 |
| 3.2. Pendelneigungsmesser | 13 |
| 3.2.1. Die "Elektronische Libelle" TALYVEL | 13 |
| 3.2.2. Das "Elektronische Nivelliergerät" NIVELTRONIC | 15 |
| 3.2.3. Die "Inclinometer" von SCHAEVITZ | 17 |
| 3.3. Schwingsaitenneigungsmesser | 19 |
| 3.4. Zusammenfassung | 21 |
| 4. UNTERSUCHUNGEN AN ELEKTRONISCHEN NEIGUNGSMESSERN | 25 |
| 4.1. Meßanordnung und Auswertemodell | 25 |
| 4.2. Die Meßgenauigkeit | 27 |
| 4.3. Stellenbedingte Abhängigkeit der Angabe | 29 |
| 4.4. Der Umkehrfehler | 38 |
| 4.5. Nullpunktkonstanz | 40 |
| 4.6. Einfluß der Temperatur | 44 |
| 4.7. Der Einfluß eines Temperaturgradienten | 52 |
| 4.8. Der Einfluß der Querneigung | 52 |
| 4.9. Das dynamische Verhalten elektronischer Neigungsmesser | 53 |
| 4.10. Zusammenfassung | 54 |
| 5. ANWENDUNG ELEKTRONISCHER NEIGUNGSMESSER | 55 |

1. EINLEITUNG

Die genaue Messung kleiner Neigungen spielt in der Geodäsie von je her eine bedeutende Rolle. Mit wenigen Ausnahmen sind die geodätischen Meßelemente am Lot orientiert und erfordern bei der Messung eine präzise Realisation der Lotrichtung im Instrumentenstandpunkt. Die Röhrenlibelle ist das klassische Instrument, das für diese Zwecke eingesetzt wird.

Ein Abriß der Leistungsfähigkeit von Sekundenlibellen, wie sie sich heute in der Literatur darstellt, wird im 2. Kapitel gegeben. Dies ist deshalb von Bedeutung, da sich die gesicherten Erkenntnisse über Flüssigkeitslibellen unmittelbar auf einen Teil der elektronischen Neigungsmesser, nämlich die Elektrolytlibellen, übertragen lassen.

Neue Aufgaben im Bauwesen, im Maschinenbau und in der Luft- und Raumfahrttechnik führten zur Entwicklung elektronischer Neigungsmesser, die in Bezug auf die Genauigkeit den Sekundenlibellen zumindest ebenbürtig, für viele Anwendungen wegen der einfachen Möglichkeit der Registrierung der Meßwerte aber weit überlegen sind.

Es gibt bisher nur wenig Veröffentlichungen, die sich mit den Eigenschaften der elektronischen Neigungsmesser befassen, und diese beziehen sich alle auf den Neigungsmesser TALLYVEL. Die Verfasser haben es sich daher zur Aufgabe gemacht, einen Überblick über die zur Zeit erhältlichen elektronischen Neigungsmesser zu erarbeiten (3. Kapitel) und durch Labormessungen für eine Auswahl davon, einen Beitrag zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit zu liefern.

Über die Laboruntersuchungen, die in den Jahren 1976 und 1977 durchgeführt wurden, wird im 4. Kapitel berichtet. Es wurden insgesamt rund 160 Beobachtungsreihen mit durchschnittlich 80 Einzelwerten als Grundlage der Ergebnisse ausgewertet.

Es ist den Verfassern ein Bedürfnis, den Herren Dipl.-Ing. Bisle, der den größten Teil der Beobachtungen durchführte, und cand.ing. Hampp, der auf verschiedenen EDV-Anlagen die notwendigen Ausgleichungen rechnete, für ihre konstruktive Mitarbeit zu danken.

Im 5. Kapitel wird ein Überblick über die bisher durch Veröffentlichungen bekannt gewordenen Erfahrungen beim Einsatz der elektronischen Neigungsmesser gegeben, und es werden weitere Möglichkeiten des Einsatzes diskutiert.

2. RÖHRENLIBELLEN

Röhrenlibellen tragen als wesentliche Bestandteile vieler geodätischer Instrumente entscheidend zur erreichbaren Genauigkeit bei. Von besonderer Bedeutung sind Sekundenlibellen in der geodätischen Astronomie als Meßmittel zur Bestimmung von Neigungen bzw. Neigungsänderungen der Ziel- und Kippachse des Beobachtungsinstrumentes. Da man bei einer Sekundenlibelle mit einem zufälligen Fehler der Bestimmung der Blasenmitte von $\pm 0,1''$ rechnen kann, ist man bestrebt, die systematischen Fehler unter diese Größe zu drücken. Nach einer Abschätzung von TARCZY - HORNOCH [31] entspricht einem Neigungsfehler von $\pm 0,1''$ in der Positionsastonomie ein Fehler in der Ortsbestimmung von mehr als 3 m.

Die Bedeutung der Libellen und die hohen Anforderungen an ihre Genauigkeit auf der einen Seite und die nicht ganz problemlose Herstellung und Handhabung auf der anderen Seite waren Anlaß für eine Vielzahl von Veröffentlichungen über Libellenuntersuchungen.

Umfangreiche Untersuchungen an 21 Libellen verschiedener Genauigkeit sind Gegenstand einer sehr ausführlichen Arbeit von REINHERTZ [24] 1890. In diesem Beitrag sind schon fast alle Fragen angesprochen, die bis in die jüngste Zeit diskutiert wurden.

2.1. Krümmungsfehler

WANACH [32] veröffentlichte 1926 die Ergebnisse von Genauigkeitsuntersuchungen an 108 Sekundenlibellen. Er bestimmte jeweils bei konstanter Blasenlänge die mittlere Libellenangabe durch eine Geradengleichung (in allerdings anderer Formulierung).

$$l + v = a + p t$$

mit l... Einstellwert am Libellenprüfer,
v... Verbesserung,
a... mittlerer Neigungswert

p... Libellenangabe,
t... Mittel aus den Ablesungen der Libellenenden
aus Hin- und Rückmessung.

Er beurteilte die Qualität der Libellen mit Hilfe der Verbesserungen v, die im wesentlichen die Schliffgenauigkeit des Libellenkörpers repräsentieren. Als Gütekriterien benutzte er den größten Wert von $|v|$ und den durchschnittlichen Fehler $f = \Sigma |v| / n$. Als wichtigstes Ergebnis der Untersuchungen sei zitiert: "Da die Ablesungen beim praktischen Gebrauch der Libellen auf ungefähr $\pm 0,1$ Skalenteil genau sind, wäre zu wünschen, daß die durch Unvollkommenheit des Schliffs verursachten Fehler der Libellenangaben höchstens von derselben Größenordnung sein sollten. Leider entspricht nur ein ziemlich kleiner Prozentsatz dieser Forderung; wollte man gar verlangen, daß v bei Sekundenlibellen den Betrag von $\pm 0,2''$ nirgends überschreiten dürfe, so müßten von den 17 untersuchten 30teiligen Libellen 13, also 76 %, beanstandet werden, von den 40teiligen 53 %, von den 80teiligen 47 %. Man ist also gezwungen, größere Maximalwerte von v zuzulassen, bei kurzen (30 - bis 40-teiligen) Libellen etwa $\pm 0,30''$, bei längeren $\pm 0,25''$. Die diese Grenzen überschreitenden Werte ... bilden noch immer ... bei Zusammenfassung in

zwei Gruppen: 24 % bei 30- bis 40teiligen und 19 % der 50- bis 80teiligen, oder 22 % aller untersuchten Sekundenlibellen."

Auf Grund dieser Libellenuntersuchungen, die unter Laborbedingungen (20°C, konstante Blasenlänge, Präzisionslibellenprüfer von Hildebrand mit einem maximalen Schraubenfehler von 0.08 Skalenteilen) durchgeführt wurden, stellte WANACH folgende, von fast allen Autoren späterer Veröffentlichungen zitierte, Güte-tabelle für Libellen auf.

| Gütebezeichnung | Sekundenlibellen | | 2"-Libellen |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | 30- bis 40-teilig | 50- bis 80-teilig | |
| sehr gut | $ f < 0,07''$ | $ f < 0,06''$ | $ f < 0,11''$ |
| gut | $0,07'' \leq f \leq 0,09''$ | $0,06'' \leq f \leq 0,08''$ | $0,11'' \leq f \leq 0,15''$ |
| genügend | $0,10'' \leq f \leq 0,12''$ | $0,09'' \leq f \leq 0,11''$ | $0,16'' \leq f \leq 0,20''$ |
| schlecht | $ f > 0,12''$ | $ f > 0,11''$ | $ f > 0,20''$ |
| max. zul. v | $\pm 0,30''$ | $\pm 0,25''$ | $\pm 0,50''$ |

Tabelle 1: Gütebezeichnungen für Röhrenlibellen nach WANACH [32]

Bei Messungen unter Feldbedingungen werden die hier zugrunde gelegten Schlifffehler durch eine Reihe weiterer systematischer Fehler überlagert, so daß auch bei guten Libellen die tatsächlichen Fehler weitaus größer ausfallen können, als in dieser Tabelle angegeben.

Einen Überblick über die Qualität der Libellen, die im ersten Viertel dieses Jahrhunderts hergestellt wurden, gibt Tabelle 2, in der die von WANACH untersuchten 17 Libellen nach Tabelle 1 klassifiziert sind.

| Teilung | Sekundenlibellen | | | | | 2"-Libellen | | | |
|-------------|------------------|----|----|----|----|-------------|----|----|----|
| | 30 | 40 | 50 | 70 | 80 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| sehr gut | 2 | 11 | 0 | 4 | 2 | 0 | 3 | 0 | 1 |
| gut | 3 | 25 | 5 | 5 | 6 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| genügend | 4 | 9 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| schlecht | 6 | 10 | 0 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| unbrauchbar | 2 | 4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 17 | 59 | 6 | 11 | 15 | 1 | 3 | 3 | 2 |

Tabelle 2: Einteilung der von WANACH [32] untersuchten 117 Libellen nach den Kriterien der Tabelle 1

TARCZY - HORNOCH [29] berichtete 1961 über die Prüfung von 26 Sekundenlibellen, wobei er insbesondere die Frage, ob ein mittlerer Parswert zur Neigungsbestimmung ausreicht, untersuchte. Er faßte das Ergebnis zusammen: "Aus diesen (Untersuchungen) ersehen wir, daß man mit durchschnittlichen Parswerten

die Neigungswinkel mit der geforderten Genauigkeit in der Regel nicht bestimmen kann und meist genauere Methoden erforderlich sind." Er stellte bei Sekundenlibellen Abweichungen von über 1" vom mittleren Parswert fest und kam in [31] zu der Folgerung, "daß der Schliff, bzw. die Gleichmäßigkeit der Krümmung der in unserer Zeit hergestellten Libellen im allgemeinen nicht besser ist als bei älteren Libellen".

Weitere Untersuchungen zur Schliffgenauigkeit veröffentlichte BREIN [3]. Durch die Neuentwicklung eines Interferenzlibellenprüfers [9] konnte er die Standardabweichung einer Neigungsänderung des Prüfers auf $\pm 0,01''$ herunterdrücken und durch Verminderung der Ablesefehler an den Blasenenden der Libelle nahezu frei von zufälligen Fehlern die systematischen Krümmungsfehler ermitteln. Diese setzen sich aus dem eigentlichen Krümmungsfehler und dem differentiellen Krümmungsfehler zusammen, der seine Ursache in der ungleichmäßigen Körnung der Schlifffläche hat. Während der zuletzt genannte eher wie ein zufälliger Fehler wirkt, nimmt der Krümmungsfehler als systematischer Fehler so große Werte an, daß eine Berücksichtigung, etwa in Form einer Korrekturtabelle, sinnvoll erscheint. Dieser hier zum ersten Mal geäußerte Gedanke, den Krümmungsfehler bei der Neigungsmessung mit Röhrenlibellen zu berücksichtigen, ist in der Folge Gegenstand einer Reihe von Veröffentlichungen.

WYSS entwickelte in [33] ein Verfahren zur Berücksichtigung der Krümmungsfehler, das von der Summenlinie S ausgeht,

$$S(l) = \int p(l)dl + c$$

wobei er die Libellenangabe p als Funktion des Standes der Blasenmitte l einführte. Für die Neigung N erhält man damit

$$N = S(l_2) - S(l_1)$$

Die so definierte Summenlinie gilt nur für eine bestimmte Blasenlänge. Auf halbgraphischem Weg werden Summenlinien für verschiedene Blasenlängen bestimmt, aus denen für die aktuelle Blasenlänge die benötigten Werte $S(l_i)$ interpoliert werden.

Eine Vereinfachung der Neigungsbestimmung wird durch die Einführung der "natürlichen Summenlinie" für die Blasenenden erzielt.

Aus dieser in einem Iterationsprozess ermittelten natürlichen Summenlinie E wird für die jeweilige Blasenmitte der Wert

$$S(l_m) = \frac{1}{2} [E(l_g) - E(l_k)]$$

gefunden, der zur Neigungsbestimmung benötigt wird. Die Brauchbarkeit des zuletzt genannten Verfahrens wurde von TARCZY - HORNOCH in [29] in Frage gestellt. Insbesondere demonstrierte er, daß der von WYSS benutzte Iterationsprozess nicht immer konvergiert. TARCZY - HORNOCH ersetzte daher das Iterationsverfahren durch ein direktes numerisches Verfahren, indem er jedem Skalenstrich der Libellenteilung einen Winkelwert so zuordnet, daß das arithmetische Mittel der den beiden Blasenenden zukommenden Winkelwerte unabhängig von der Blasenlänge den Neigungswinkel liefert, der der Blasenmitte der Libelle entspricht. Der Meß- und Rechenaufwand für die Bestimmung der Winkelwerte ist beträchtlich, die Handha-

bung zur Ermittlung der Neigungswerte jedoch unkompliziert. Bei diesem relativ einfachen Modell muß mit restlichen Krümmungsfehlern gerechnet werden, die, ausgedrückt durch den durchschnittlichen Fehler, etwa 0,1" betragen. Mit diesem Verfahren ist es möglich, auch mit weniger guten Libellen, den Neigungswinkel mit einer Standardabweichung von $\pm 0,2''$ zu bestimmen.

BARNES und MÜLLER berichteten in [1] über ihre Untersuchungen an zwei T4 - Libellen gleichen Typs und Herstellers. Die ermittelten Kennlinien der beiden Libellen sind sehr unterschiedlich und führen zu dem Schluß, daß es nicht möglich ist, von einer Libelle auf eine andere zu schließen. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen muß daher die Schliffkurve jeder einzelnen Libelle untersucht werden, um den der jeweiligen Blasenlänge und dem Blasenstand zukommenden Parswert für die genaue Neigungsbestimmung verfügbar zu haben. Bei den untersuchten Libellen ließen sich die Kennlinien durch Polynome 5. Grades mit ausreichender Genauigkeit annähern. Ein weiteres Modell zur Darstellung des Parswertes von Sekundenlibellen benutzten DEICHL und LUDWIG in [5]. Die Abhängigkeit der Libellenangabe von der Ablesestelle und von der Blasenlänge wird durch einen zweidimensionalen kubischen Ansatz mit zehn unbekanntem Koeffizienten ausgedrückt. Die Koeffizientenbestimmung erfolgt durch eine mehrstufige Ausgleichung der bei verschiedenen Blasenlängen beobachteten Meßreihen. Gegenüber dem linearen Ansatz (WANACH [32], HIRVONEN [15]) geht der mittlere Fehler einer Beobachtung auf etwa ein Drittel zurück, ist jedoch mit $\pm 0,2''$ noch erheblich größer als der mittlere Ablesefehler, so daß auch bei diesem Modell noch systematische Fehler unerfaßt bleiben.

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Modellen zur Bestimmung der Kennlinie der Röhrenlibelle schlug BRUNKEN [4] ein Modell vor, in dem die wahre Form der Schliffkurve aus Beobachtungen bei verschiedenen Blasenlängen ermittelt wird. In der graphischen Darstellung der Schliffkurve wird sodann die Blase als Sehne dargestellt und ihre Neigung abgegriffen. Dieser Vorgang kann auch numerisch durchgeführt werden, wenn die Schliffkurve durch eine empirische Funktion angenähert wird, für die z.B. nach BRUNKEN eine Fourier-Reihe geeignet ist. Bei einem in [4] mitgeteilten Beispiel zeigt sich, daß bei einer Ausgleichung mit 12 Koeffizienten der mittlere Fehler einer Beobachtung den optimalen Wert von $\pm 0,09''$ erreicht hat. Wird die Neigungsbestimmung mit der ausgeglichenen Schliffkurve durchgeführt, so erhält man eine erhebliche Genauigkeitssteigerung gegenüber der Verwendung eines mittleren Angabewertes. In [4] wird für eine untersuchte Libelle ein mittlerer Neigungsfehler von $\pm 0,12''$ erhalten.

Eine weitere Verfeinerung des mathematischen Modells zur Erfassung der Krümmungsfehler dürfte nicht erfolgversprechend sein, da die verbleibenden Restfehler scheinbar unregelmäßig verteilt sind und die Größenordnung anderer Fehlereinflüsse, insbesondere auch die zufälligen Ablesefehler, nicht übersteigen.

Ein Hinweis verdient noch Beachtung. TARCZY - HORNOCH schreibt in [29]: "Wir haben Sekundenlibellen kennengelernt, die ihren durchschnittlichen Parswert innerhalb von zwei bis drei Jahren bis zu 50 % ihres ursprünglichen Wertes geändert haben." Wenn man diese Beobachtungen verallgemeinern kann, so ist daraus die Forderung abzuleiten, daß die Libellenuntersuchungen in regelmäßigen Abständen auf dem Libellenprüfer wiederholt werden müssen, um die momentan gültige Kennlinie bzw. die gültigen Konstanten des mathematischen Modells zu erhalten.

2.2. Äußere Fehlereinflüsse

Die Herstellungsfehler der Röhrenlibellen können nach 2.1, wenn auch mit einigem Aufwand, durch ein mathematisches Modell weitgehend erfaßt und damit bei der Neigungsmessung berücksichtigt werden. Anders verhält es sich mit den äußeren Einflüssen, insbesondere mit den Temperatureinflüssen, auf die Genauigkeit der Neigungsmessung mit Libellen. Mit diesem Problem haben sich insbesondere REINHERTZ [24], SAMEL [25] und DRODOFSKY [6] befaßt.

2.2.1. Fehler wegen Temperaturänderungen

Mit der Temperatur ändert sich das Volumen der Libellenflüssigkeit und damit die Größe der Libellenblase. Da die Richtkraft der Libellenblase und als ihre Funktion die Einstellgenauigkeit mit wachsender Blasenlänge zunimmt, hat die Temperatur indirekten Einfluß auf die Genauigkeit der Neigungsmessung. Nach REINHERTZ [24] sollte die Länge der Blase bei Feldmessungen mindestens die Hälfte der Teilung einnehmen und bei Labormessungen, d.h. bei günstigen Meßbedingungen, bis auf 3/4 der Teilungslänge vergrößert werden. Um diese günstigen Blasenlängen einstellen zu können, sind Sekundenlibellen fast ausnahmslos als Kammerlibellen ausgebildet. Da es unzweckmäßig ist, im Verlaufe einer Meßreihe die Blasenlänge durch einen Eingriff zu ändern, sollte vorher die während der Meßreihe zu erwartende Temperaturänderung abgeschätzt und die daraus resultierende Änderung der Blasenlänge in Betracht gezogen werden.

REINHERTZ [24] beobachtete eine beträchtliche Änderung der Libellenangabe mit der Temperatur und vermutete als Ursache Spannungen zwischen Libellenrohr und Libellenfassung, die wegen der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Glas und Metall entstehen. Durch theoretische Untersuchungen und durch Meßreihen mit gefaßten und ungefaßten Libellen kam SAMEL [25] zu folgenden Resultaten, die später von DRODOFSKY [6] bestätigt wurden: "Auf die Angabe von ungefaßten Libellen übt die Temperatur, insofern es sich um eine Krümmungsänderung des Schliffbogens handelt, innerhalb der praktisch vorkommenden Grenzen keinen nachweisbaren Einfluß aus."

Bei eingegipsten Libellen kann ... "Abnahme der Angabe mit zunehmender Temperatur als tatsächlich vorhanden angesehen werden".

Bei neueren Libellen wird durch die Ausgestaltung der Verbindung zwischen Glas und Metall das Auftreten von Temperaturspannungen möglichst klein gehalten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß eine gleichmäßige Änderung der Libellentemperatur im Bereich der üblichen Gebrauchstemperaturen keinen wesentlichen Einfluß auf die Genauigkeit ausübt, sofern die Libelle gut gefaßt ist und mit konstanter Blasenlänge gearbeitet werden kann.

2.2.2. Fehler wegen Temperaturgefälle

Von erheblichem Einfluß auf die Genauigkeit der Neigungsmessung ist ein Temperaturgefälle in Längsrichtung der Röhrenlibelle. Diese Fehlerquelle ist besonders unangenehm, da sie schwer zu erfassen oder durch konstruktive Maßnahmen zu vermeiden ist. Schon REINHERTZ stellte 1890 in [24] fest: "Bekanntlich ist das größte Hindernis für gute Libellenbeobachtungen ungleichmäßige Erwärmung der Libelle, in Folge deren durch die Änderung des Gleichgewichtszustandes und der Adhäsion die Blase nach der Seite hin ver-

schoben wird, an welcher der geringere Druck und die geringere Adhäsion stattfindet, also nach der wärmeren Seiten hin."

Die ersten Experimente zur Untersuchung dieses Einflusses waren qualitativer Art. DRODOFSKY [6] leitete dann auf Grund der physikalischen Gesetzmäßigkeit die funktionale Beziehung zwischen der Temperaturdifferenz an den Enden einer Röhrenlibelle und dem daraus resultierenden Libellenausschlag β ab.

$$\beta = 1,3 \cdot 10^5 \alpha \gamma \tau$$

Man erhält nach dieser Formel β in Winkelsekunden, wenn α die Laplacesche Konstante

$$\alpha = \sqrt{\frac{2H}{\rho g}}$$

H ... Oberflächenspannung
 ρ ... Dichte der Flüssigkeit
g ... Fallbeschleunigung

in Millimeter eingeführt wird, γ , der stets negative Temperatur-Koeffizient der Oberflächenspannung, in Grad hoch minus eins und das Temperaturgefälle τ in Grad pro Millimeter. Die Größen α und γ sind Materialkonstanten, deren Produkt für Äthyläther folgenden Wert hat:

$$\alpha \cdot \gamma = 0,013 \text{ mm/Grd}$$

Danach erhält man für eine 150 mm lange Äthyläther-Libelle bei einer Temperaturdifferenz von 0,01°C an den Enden einen Ausschlag von 0,11".

Sehr ausführlich beschäftigten sich TARCY - HORNOCH und ALPAR in [30] mit diesem Problem. Sie berichteten von quantitativen Untersuchungen an Wild T4 - Horrebow-Libellen, bei denen sie einen Libellenausschlag von 2" pro Grad Celsius Temperaturdifferenz fanden. Dieser Wert ist nur ein Fünftel dessen, was nach DRODOFSKY hätte auftreten müssen. Die Hauptursache für die Diskrepanz wird darin gesehen, daß in die Formel von DRODOFSKY das Temperaturgefälle in der Libellenflüssigkeit einzuführen ist, während bei dem Versuch die Lufttemperatur an den Libellenenden gemessen wurde.

Als Maßnahmen gegen diese Fehlerquellen wird eine gute Isolierung der Libelle empfohlen und die Abschirmung gegen Wind sowie gegen Wärmeausstrahlung und Atemluft des Beobachters.

2.2.3. Verbindung mit dem Instrument

Die Libellen sind in der Regel am Instrument oder in einem abnehmbaren Zusatzteil justierbar gelagert. Mit der Frage, ob durch die Justierschrauben Spannungen in der Libelle erzeugt werden, die sich als Fehlerquelle auswirken, befaßte sich GROOT in [12]. Die Bestimmung der Libellenangabe einer T4-Libelle erfolgte in Gebrauchslage am Instrument mit dem Horizontal- und Vertikalkreis nach der "Wisconsin"-Methode. Der Vergleich der Libellenangaben zwischen mehreren Meßreihen für unterschiedliche Blasenlängen bei zwei um eine Vierteldrehung verschiedenen Stellungen der Justierschrauben zeigt eindeutig eine Änderung der Angabe. Diese Angabenänderung beträgt 0,02" bei der untersuchten Libelle und ist für alle Blasenlängen konstant.

2.3. Das Schwingungsverhalten

DRODOFSKY hat in [6] praktische und theoretische Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Libellen veröffentlicht. Das Schwingungsverhalten wird durch den Dämpfungsfaktor und die Schwingungsdauer charakterisiert. Es ist zwar ohne direkten Einfluß auf die Genauigkeit, aber von großer praktischer Bedeutung für die Handhabung der Libellen. Man wird für die Praxis daher sinnvollerweise einen großen Dämpfungsfaktor und eine geringe Schwingungsdauer anstreben. Die Dämpfung hängt im wesentlichen von der benutzten Flüssigkeit und der Größe der Blase ab. Da aber die Genauigkeit der Neigungsmessung, wenn nur zufällige Fehler wirken, näherungsweise proportional zur Blasenlänge ist, kommt zur Vergrößerung des Dämpfungsfaktors praktisch nur die Verwendung einer entsprechenden Flüssigkeit in Betracht.

DRODOFSKY schlägt in [6] vor, das Schwingungsverhalten zur Kennzeichnung einer Libelle mit anzugeben. Für eine mit Äthyläther gefüllte Libelle findet man einen Dämpfungswert von etwa 0,5, während nach DRODOFSKY ein Wert zwischen 0,8 und 1,0 optimal sein müßte. Die Schwingungszeit beträgt etwa 40 Sekunden.

2.4. Zusammenfassung

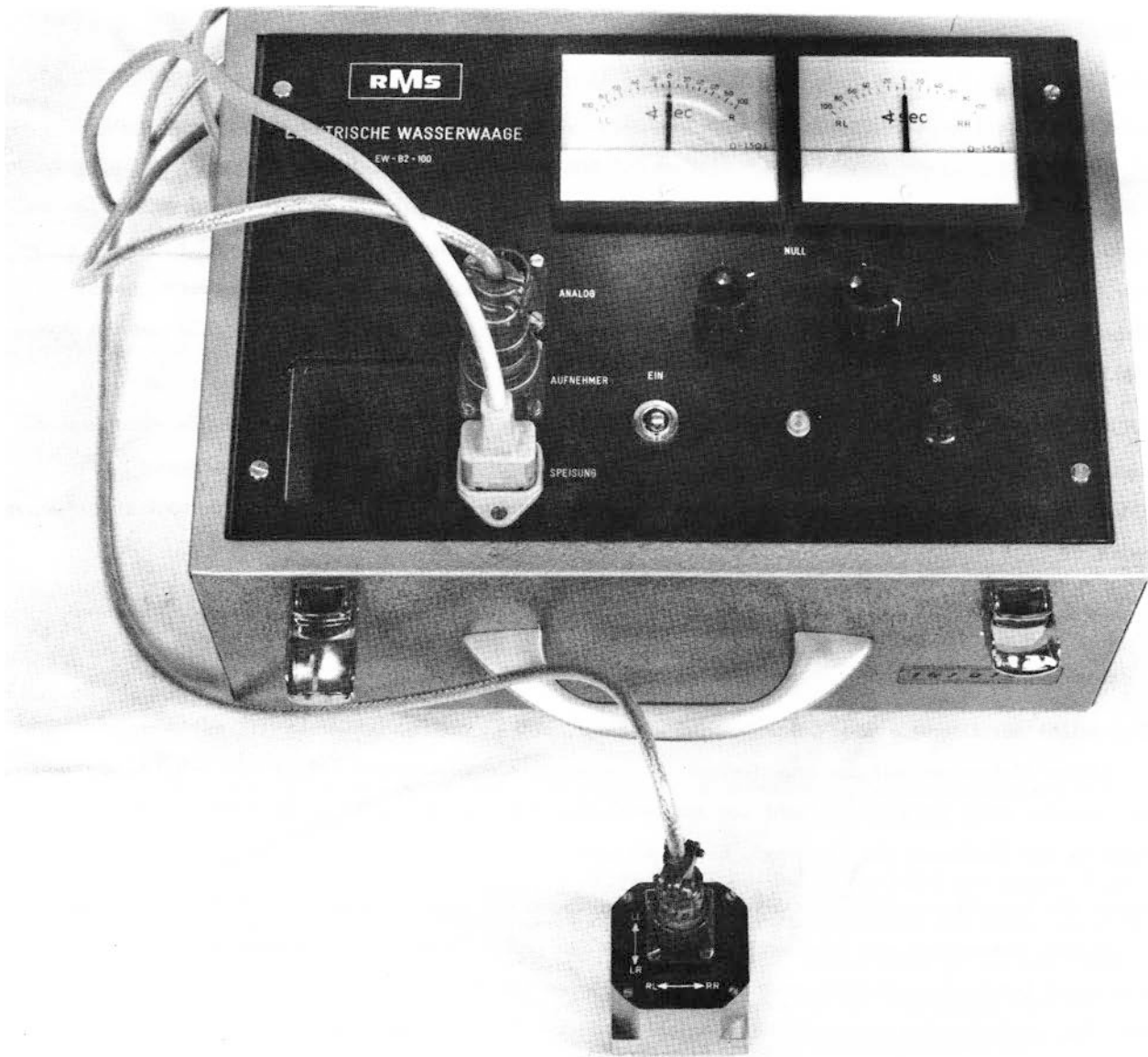
Die Durchsicht der Literatur über Sekundenlibellen zeigt, daß es äußerst schwierig ist, mit diesen Instrumenten kleine Neigungen mit der angestrebten Genauigkeit, einem mittleren Fehler von $\pm 0,1''$, durchzuführen. Ursache dafür ist eine Vielzahl von systematischen Fehlern, die teils in der Fertigung der Libelle und teils in den Einflüssen der Umgebung begründet sind.

Der durch die Unvollkommenheit des Schliffes der Lauffläche der Blase verursachte nichtlineare Zusammenhang zwischen Blasenstand und Libellenneigung liefert den größten Anteil am systematischen Gesamtfehler. Er kann durch Laboruntersuchungen erfaßt und durch ein mathematisches Modell weitgehend ausgedrückt werden. Die verbleibenden systematischen Restfehler werden aber den Wert von $\pm 0,1''$ kaum unterschreiten. Weitere Fehler der Libelle sind der differentielle Krümmungsfehler und mögliche Spannungen zwischen Libellenrohr und Fassung bzw. Instrument.

Als bedeutendste von der Umgebung verursachte Fehlerquelle ist ein Temperaturgefälle in der Libellenflüssigkeit zu betrachten. Erfassen und berücksichtigen läßt sich der so entstehende systematische Fehler nur in Ausnahmefällen. Durch konstruktive Maßnahmen (gute Isolierung, Abschirmung gegen Wind und Wärmestrahlung) kann dieser systematischen Fehlerquelle entgegengewirkt werden.

Der zufällige Fehler der Neigungsmessung hängt von der Richtkraft, die ihrerseits eine Funktion der Blasenlänge ist, ab. Bei genauen Neigungsmessungen sollte die Blase möglichst groß gewählt werden, wodurch eine Verkleinerung des Meßbereiches hingenommen werden muß.

Ohne direkten Einfluß auf die Genauigkeit, aber wichtig für die Handhabung ist eine gute Dämpfung, die zügiges Arbeiten möglich macht.



Libelle
(2-achsrig)

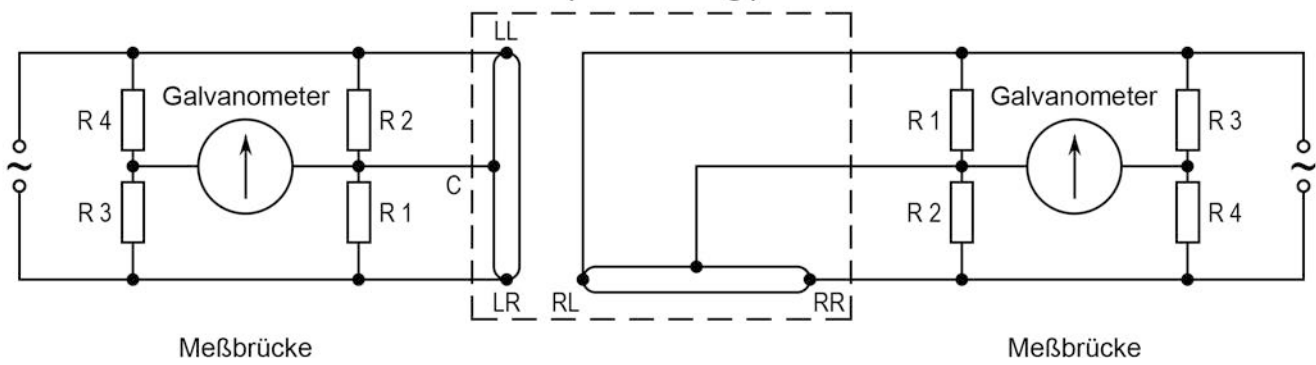


Abb. 1: Die "Elektronische Wasserwaage" EWB von SCHMIDT mit Schaltskizze.

3. ELEKTRONISCHE NEIGUNGSMESSER

Seit längerer Zeit schon gibt es Neigungsmesser für Anwendungen im Maschinenbau und im Bauwesen, die von Firmen hergestellt werden, die auf Elektronik und Meßtechnik spezialisiert sind. Diese Neigungsmesser, sie werden in Anlehnung an die traditionellen Röhrenlibellen des geodätischen Instrumentenbaus auch elektronische Libellen genannt, sind bis zu einer solchen Reife entwickelt worden, daß ihr Einsatz für geodätische Zwecke interessant geworden ist.

Die Bauart der elektronischen Neigungsmesser ist ganz auf die genannten Anwendungen zugeschnitten, so daß sie derzeit wegen ihrer Form und Größe nicht als Ersatz der Röhrenlibellen als Bauteil geodätisch-optischer Instrumente geeignet erscheinen. Eine Weiterentwicklung in diese Richtung erscheint aber als möglich und erfolgversprechend.

Ihr Einsatz bei Überwachungsaufgaben im Bauwesen und im Großmaschinenbau hat sich inzwischen sehr bewährt. Hier sind es besonders die Möglichkeiten der automatischen Ablesung, der Signalübertragung und der permanenten Messung, die zur Rationalisierung der Vermessungsarbeiten führten und sich als Vorteil gegenüber den Röhrenlibellen erwiesen.

Wir wollen uns hier nur mit solchen elektronischen Neigungsmessern befassen, deren Angabe $p \leq 10''$ ist. In diesem Abschnitt werden die bekannt gewordenen Geräte nach ihrer Funktionsweise klassifiziert und einige Entwicklungen, gestützt auf Firmendrucksachen, näher beschrieben. Jedes in die Untersuchung einbezogene Modell wird durch ein Schaltbild näher erläutert und durch ein Photo veranschaulicht. Beim Vergleich der Bilder ist zu berücksichtigen, daß kein einheitlicher Maßstab eingehalten werden konnte. Die genauen Dimensionen der Geräte können der Tabelle 3 entnommen werden.

3.1. Elektrolytlibellen

Die Elektrolytlibellen nutzen dasselbe Prinzip wie die klassischen Flüssigkeitslibellen. Durch den Einfluß der Schwerkraft spielt eine Gasblase ein, deren genaue Position unter einer geschliffenen Lauffläche bestimmt wird. Als Libellenflüssigkeit wird ein Elektrolyt benutzt, um den Blasenstand abgreifen zu können. Die Ablesegenauigkeit kann so gegenüber der visuellen Ablesung erheblich gesteigert werden.

Die Lebensdauer der Elektrolytlibellen ist begrenzt. Durch Mikroporositäten des Glases geht Flüssigkeit verloren, durch chemische Lösung von Bestandteilen des Glases ändert sich der Elektrolyt und durch zu hohe Betriebswerte kann es zur Elektrolyse kommen. Auf diese Vorgänge hat die Temperatur einen entscheidenden Einfluß. Die Betriebs- und Lagerdauer einer Elektrolytlibelle nimmt mit steigender Temperatur ab.

3.1.1. Die "Elektrische Wasserwaage" EWB von SCHMIDT (Abb. 1)

Die mit einer Wechselspannung gespeiste "Elektrische Wasserwaage" gibt es in zwei Ausführungen: Einachsige und zweiachsige. Die einachsige Libelle besteht aus einem gebogenen Glasrohr mit eingeschmolzenen Elektroden und die zweiachsige Libelle auf einem runden Glasgefäß, dessen Boden vier Elektroden trägt, wobei der Boden innen hohl geschliffen ist.

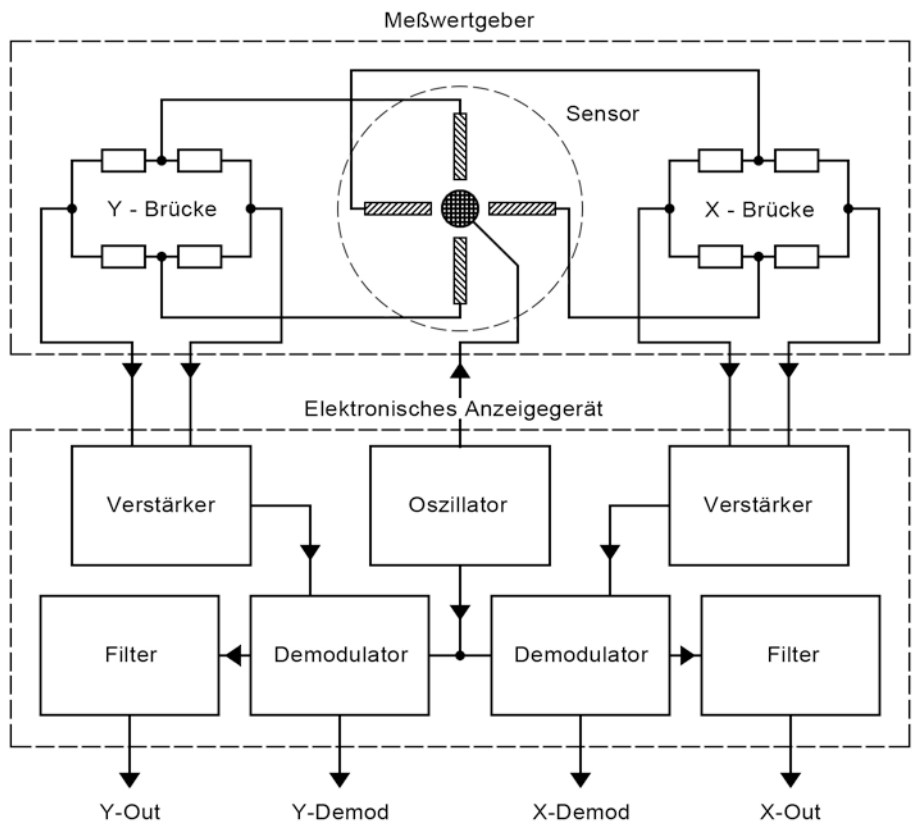
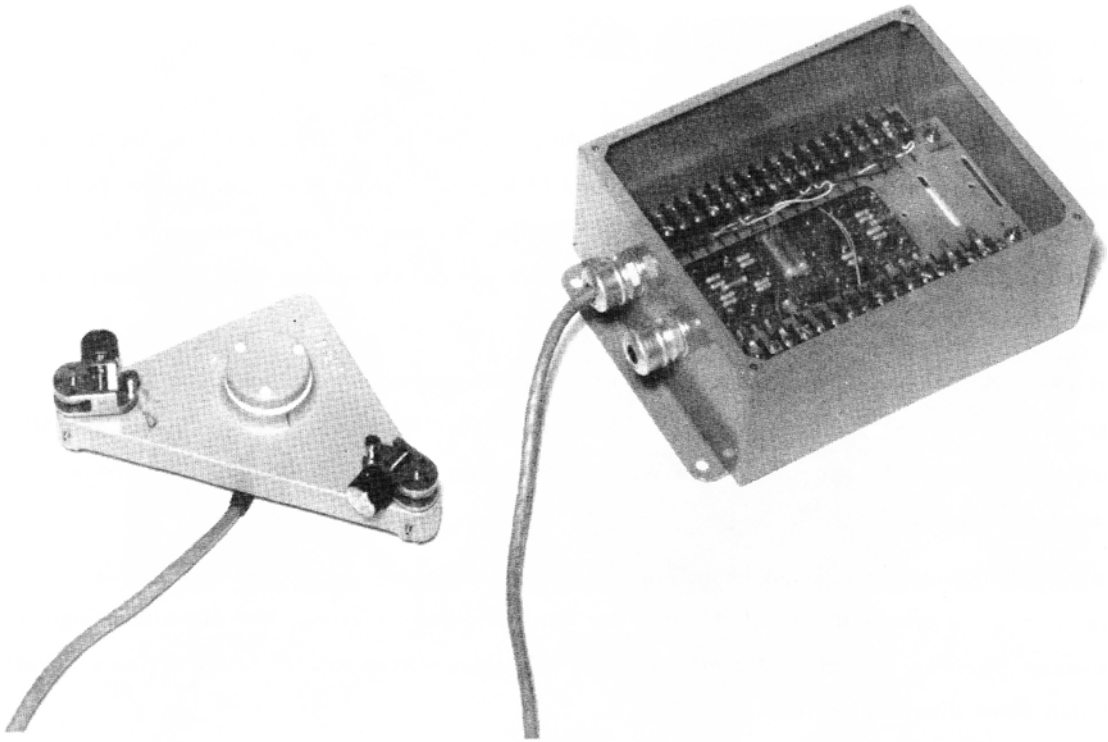


Abb. 2: Das "Biaxial Tiltmeter" von KINEMETRICS mit Schaltskizze.

Durch eine einspielende Luftblase im Libellenkörper, der mit einer elektrisch leitenden Flüssigkeit gefüllt ist, werden die Elektroden mehr oder weniger bedeckt. Damit ändert sich der elektrische Widerstand zwischen der Hauptelektrode und den zwei oder vier Gegenelektroden. Für jede Achse getrennt wird so ein Rechtecksignal gewonnen. Das Signal bzw. die Signale werden verstärkt, phasenabhängig gleichgerichtet und richtungsabhängig angezeigt.

Der Meßbereich für beide Ausführungen beträgt $\pm 100''$, ein Skalenteil entspricht $\pm 10''$.

Für die eigene Untersuchung stand das zweiachsige Modell EW-B2-100, Ger.Nr.: 1337, zur Verfügung. Die beiden senkrecht zueinander stehenden Meßachsen sind mit "LL - LR" und "RL - RR" bezeichnet.

3.1.2. Das TM-1 "Biaxial Tiltmeter" von KINEMATRICS (Abb. 2)

Der KINEMATRICS Neigungsmesser TM-1, der von Rockwell International für das U.S. Raumfahrtprogramm entwickelt wurde, besteht aus einem zylindrischen Gefäß, das mit einer Glaskuppe abgeschlossen ist. In der Kuppe sind vier Streifenelektroden aus Platin senkrecht zueinander und in der Grundfläche eine Platinelektrode zentrisch angebracht. Das Gefäß ist mit einer leitenden Flüssigkeit gefüllt, die eine Luftblase enthält. Gegenüberliegende Elektroden sind mit je zwei Widerständen verbunden. Daraus ergeben sich zwei Widerstandsbrücken, deren Ausgangsspannungen der Bewegung der Blase längs der zwei Achsen entsprechen. Wird das Gerät geneigt, dann bewegt sich die Blase, so daß die Streifenelektroden mehr oder weniger bedeckt sind. Dadurch kommen die zwei Widerstandsbrücken aus dem Gleichgewicht. Die sich daraus ergebenden Ausgangsspannungen sind lineare Funktionen der Neigung und der Beschleunigung im gesamten Meßbereich. Das Anzeigergerät führt die Verstärkung, Demodulation und Filterung der Ausgangssignale beider Brücken durch. Die Signale werden gleichzeitig analog erhalten. Das Anzeigergerät hat zwei verschiedene Ausgänge. Der "Demod"-Ausgang gibt die Rotation und/oder horizontale Beschleunigung über dem Frequenzbereich von 0 bis 1 Hz an. Er kann zur Bestimmung hoher Frequenzbewegungen, die zusammen mit seismischen Beschleunigungen auftreten, benutzt werden. Der "Out"-Ausgang gibt Signale, die sich aus dem Durchlaufen der X und Y Demodulationssignale durch einen Verstärker und Filter mit wählbarer Tastfrequenz von 1,6 und 0,008 Hz ergeben. Dieser Ausgang dient zur Messung von Langzeitneigungen und/oder kurz- oder langperiodischer horizontaler Seismizität.

3.2. Pendelneigungsmesser

Die Pendelneigungsmesser nutzen den Einfluß, den die Schwerkraft auf ein Horizontal- oder Vertikalpendel ausübt. Sie sind mit dem klassischen Fadenlot verwandt, erlauben jedoch durch die Wahl geeigneter elektrischer Schaltungen eine bedeutend höhere Auflösung.

3.2.1. Die "Elektronische Libelle" TALYVEL (Abb. 3)

Die batteriegespeiste TALYVEL besteht aus einer Libelleneinheit und einem Anzeigergerät. In der Libelleneinheit hängt ein ölgedämpftes Pendel an fünf Drähten zwischen zwei Spulen. An einem Oszillator liegt eine Wechselfrequenz an, welche die Meßbrücke, gebildet aus den Widerständen R1 und R2 und den Spulen 1 und 2, speist (siehe Abb. 3). In abgeglichenem Zustand liegt keine Wechselfrequenz am Verstärker.

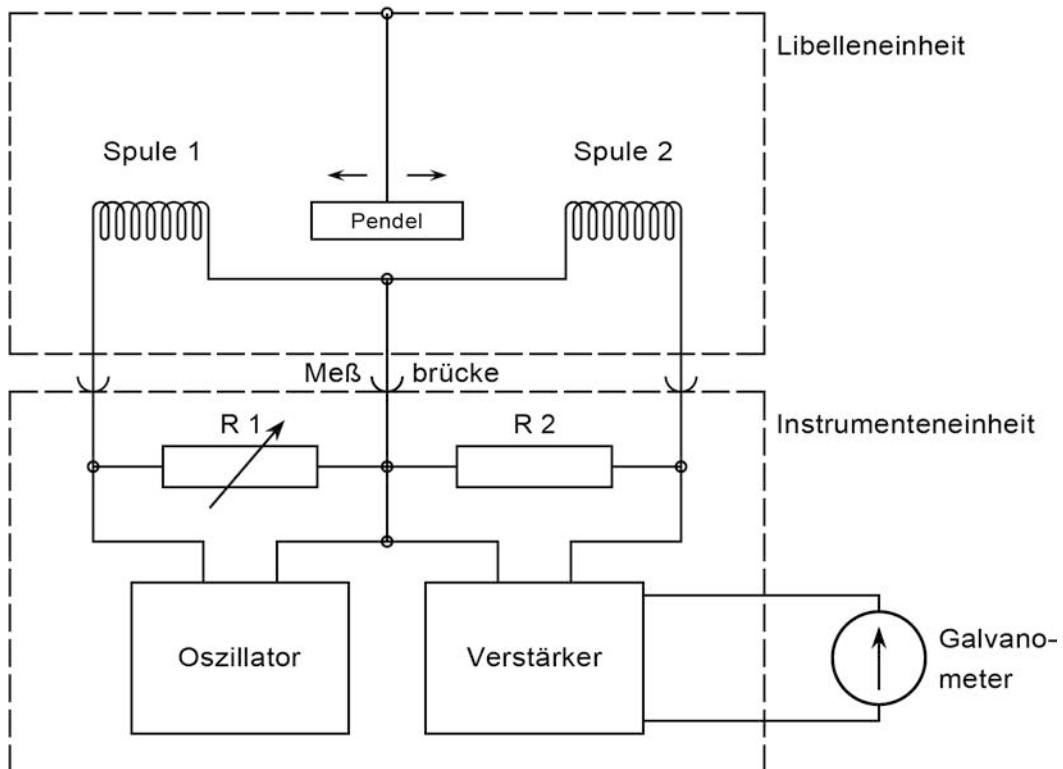
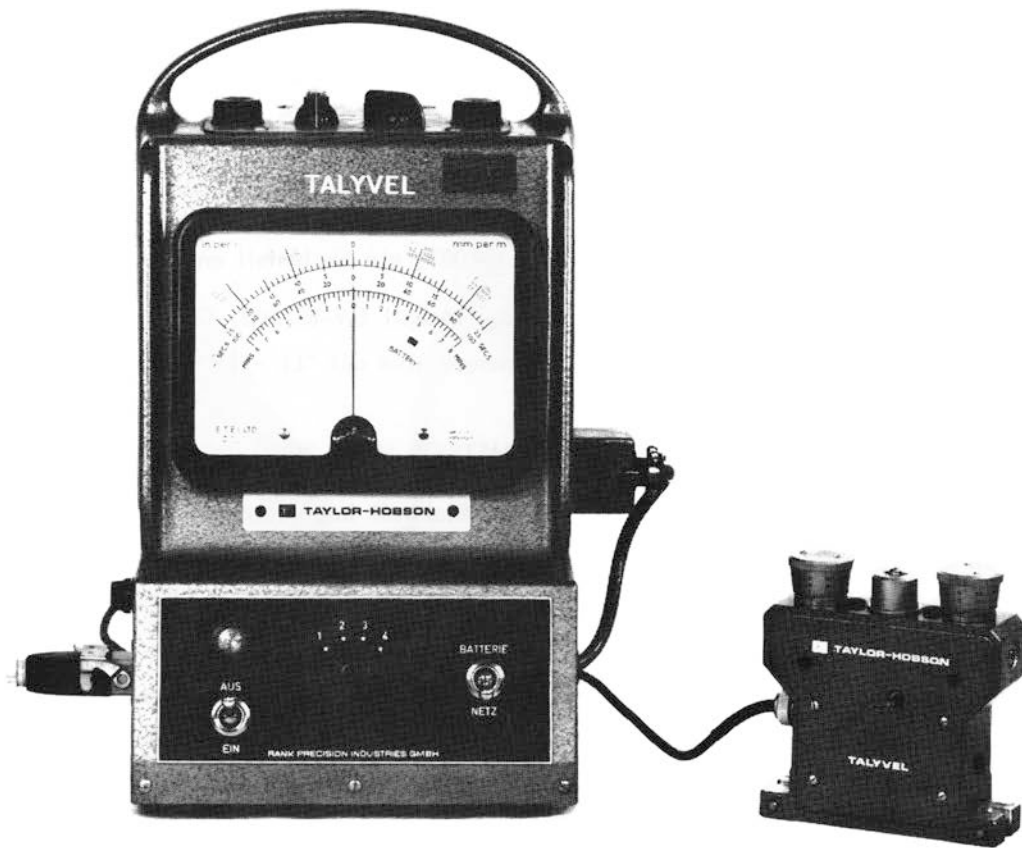


Abb. 3: Die "Elektronische Libelle" TALYVEL mit Vielfachschaltweiche und Blockschaltbild.

Bei Neigung der Gebereinheit ändert das Pendel seine Lage relativ zu den Spulen. Dadurch ändert sich gleichzeitig der induktive Widerstand von Spule 1 und 2, wodurch eine Stromänderung im Nullzweig der Brückenschaltung hervorgerufen wird. Die nun am Eingang des Verstärkers anliegende Spannung bewirkt nach ihrer Verstärkung einen Ausschlag des Galvanometers, das die Neigungsänderung in Winkleinheiten (Minuten und Sekunden) und Neigungswerten (mm/m) anzeigt. Die TALYVEL gibt es in zwei Modellen:

TALYVEL 1 mit den drei Bereichen

$\pm 8'$ (1 Skalenteil $\hat{=}$ 20"), $\pm 100''$ (1 Skalenteil $\hat{=}$ 4") und $\pm 50''$ (1 Skalenteil $\hat{=}$ 2") und

TALYVEL 2 mit den drei Bereichen

$\pm 8'$, $\pm 100''$ und $\pm 25''$ (1 Skalenteil $\hat{=}$ 1").

Besonders zu erwähnen ist eine Vielfachschiene, an die bis zu vier Gebereinheiten wahlweise für Netz- und Batteriebetrieb angeschlossen werden können. Die Schiene wird unter dem Anzeigegerät befestigt und ermöglicht so das Einschalten jeweils eines Neigungsaufnehmers.

Eine ausführliche Beschreibung der TALYVEL kann bei MONTAG [19] nachgelesen werden.

Für die Untersuchungen, deren Ergebnisse in den nachfolgenden Abschnitten mitgeteilt werden, standen vier Neigungsmesser vom Typ TALYVEL 2 zur Verfügung. Hauptaugenmerk wurde auf den empfindlichen Bereich von $\pm 25''$ gelegt. Die Mehrzahl der Messungen wurde mit dem als TALYVEL A bezeichneten Gerät durchgeführt. Bei den Geräten B, C und D handelt es sich jeweils um eine andere Neigungsgebereinheit, die stets an das zu TALYVEL A gehörende Anzeigegerät angeschlossen wurden.

| Neigungsmesser | Nr. des Gebers | Eigentümer |
|----------------|----------------|---|
| TALYVEL A | 112/877 - 706 | WE Geodäsie der HSBw München |
| TALYVEL B | 112/753 - 2668 | Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München |
| TALYVEL C | 112/753 - 4443 | Lehrstuhl für Geodäsie der TU München |
| TALYVEL D | 112/753 - 4551 | Lehrstuhl für Geodäsie der TU München |

3.2.2. Das "Elektronische Nivelliergerät" NIVELTRONIC (Abb. 4)

Das Meßprinzip des NIVELTRONIC beruht ebenfalls auf der Eigenschaft des Pendels, nach Auslenkung in seine Ruhelage – die Senkrechte – zurückzuschwingen. Am Ende des an einer Blattfeder aufgehängten Pendels ist ein Ferritkern befestigt, der in eine mit dem Gerätekörper verbundene und mit einer Wechselspannung gespeiste Doppelspule eintaucht.

Beim Neigen des NIVELTRONIC schwingt das Pendel sofort in die Ruhelage zurück. Seine Schwingung wird durch eine magnetische Dämpfung gebremst. Die Lageänderung des Ferritkerns beeinflusst die Induktivität der Doppelspule, deren Phase der Neigungsrichtung des NIVELTRONIC entspricht. Dieses elektrische Signal wird verstärkt, gleichgerichtet und auf dem Galvanometer als Meßwert in analoger Form angezeigt.

Meßeinheit und Anzeigegerät sind in der Meßbasis – einem starren Gußkörper mit präzise gearbeiteten Auflageflächen – eingebaut, so daß kein Kabel die Handhabung stört. Als Stromquelle dient eine handelsübliche Batterie mit 1000 Betriebsstunden.

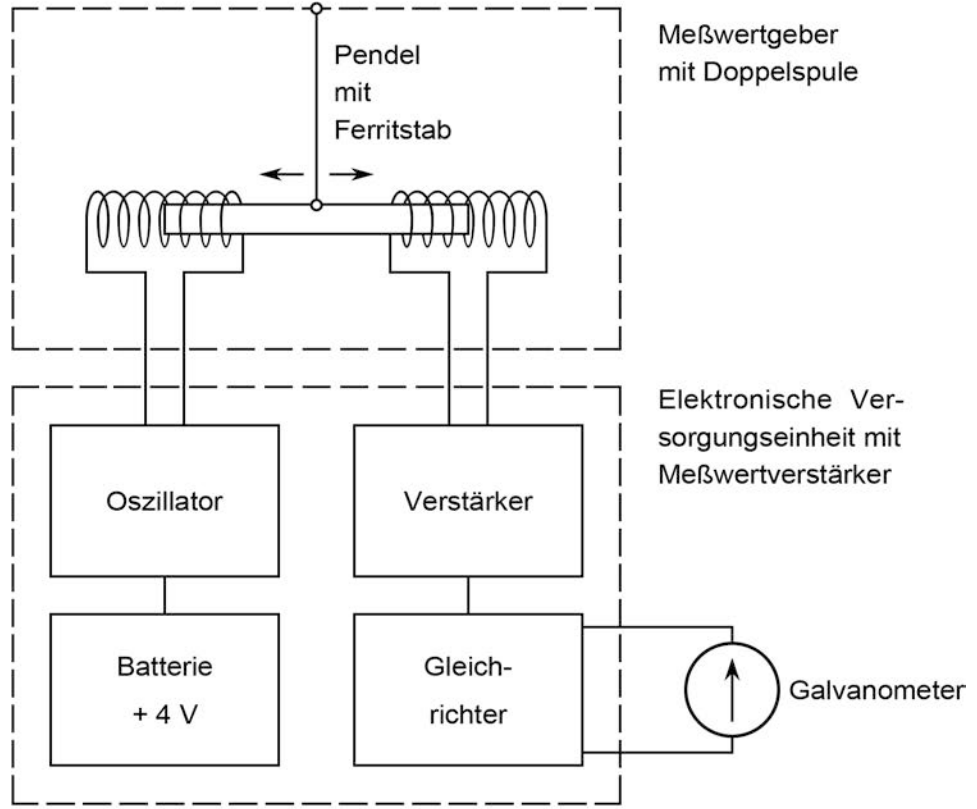
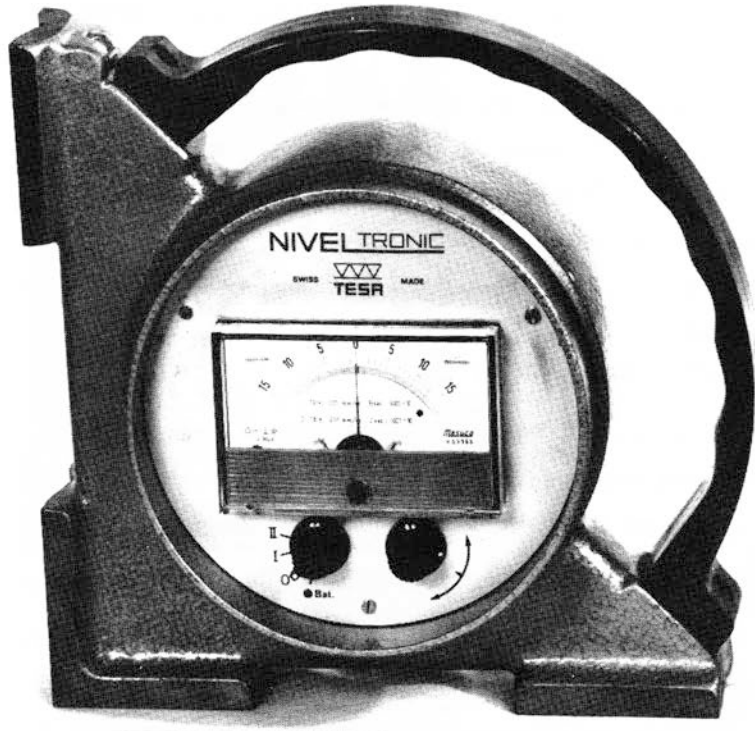


Abb. 4: Das "Elektronische Nivelliergerät" NIVELTRONIC mit Blockschaltbild.

Das NIVELTRONIC wird als Horizontalmodell oder als Winkelmodell (zum Prüfen vertikaler Ebenen) gebaut.

Die Nullpunkteinstellung erfolgt durch eine Grobeinstellung mit Exzenter (Bereich $\pm 6'$) und die Feineinstellung mit dem Potentiometer (Bereich $\pm 30''$). Es stehen zwei Meßbereiche zur Verfügung: $\pm 150''$ (1 Skalenteil $\hat{=}$ $10''$) und $\pm 30''$ (1 Skalenteil $\hat{=}$ $2''$).

Die kompakte Bauweise führt zu dem relativ hohen Gewicht des Gerätes von 4,1 kg, das die Anwendungsmöglichkeiten für geodätische Aufgabenstellungen stark einschränkt. Für die Untersuchungen wurde das eigene Gerät, Nr. GW S1 36 0018, verwendet.

Nach Firmendruckschriften vom Juni 1978 bieten die Firmen TESA/WYLER zwei neue, handlichere Neigungsmesser an, die beide nach folgendem Prinzip arbeiten: Eine Massenscheibe, aufgehängt an Blattfedern und eingebaut zwischen Elektroden, liefert die Neigungsinformation durch Änderung ihrer Lage, die zu einer Änderung der Kapazitäten zwischen Scheibe und Elektroden führt. Das Modell MINILEVEL wiegt als Kompaktgerät nur 1,3 kg und ist mit einer numerischen Anzeige (DC-Elemente) ausgestattet. Es stehen zwei Meßbereiche zur Verfügung: Bereich I: Meßbereich $\pm 1^\circ$, $\pm 2''$ und Bereich II: Meßbereich $\pm 7'$, $\pm 0,2''$.

Beim Modell LEVELTRONIC sind Geber- und Anzeigeeinheit getrennt. Der Geber wiegt mit horizontaler Basis 1,5 kg. Sechs Meßbereiche sind wählbar zwischen $\pm 2,6^\circ$ und $\pm 20''$. Der Wert eines Teilungsintervalls der Anzeige beträgt entsprechend $\pm 5'$ bis $\pm 0,5''$.

3.2.3. Die "Inclinometer" von SCHAEVITZ (Abb. 5)

Die SCHAEVITZ Neigungsmesser arbeiten nach dem Prinzip des Horizontalpendels. Wird der Neigungsaufnehmer, der mit ± 15 V Gleichstrom gespeist wird, um den Winkel α geneigt, so versucht das Horizontalpendel, "Paddel", sich auf Grund der Schwerkraft in Richtung der Neigung zu bewegen. Jede so entstehende Bewegung wird durch den Sensor B in ein Steuersignal umgewandelt, das dem Drehmomentmotor C zugeführt wird. Dieser erzeugt ein der Größe nach gleiches, aber entgegengerichtetes Drehmoment, das die seismische Masse in ihrer Lage festhält.

Der Strom des Drehmomentmotors ist dem Sinus des Neigungswinkels direkt proportional. Er wird durch den Stabilisierungswiderstand R_0 geleitet, wodurch die sehr genaue Ausgangsspannung erzeugt wird.

An beiden Seiten des "Paddels" sind Begrenzer angebracht, um die Bewegung in ausgeschaltetem Zustand zu begrenzen. Beim Einschalten bewegt sich das "Paddel" automatisch in die Nullposition.

In horizontaler Position ist das Ausgangssignal Null, bei Neigungen maximal ± 5 V, was bei dem kleinsten Meßbereich (Typ LSOC) $\pm 1^\circ$ entspricht. Als Anzeigegerät kann ein handelsüblicher Digital-Voltmeter mit einer 4-5 stelligen Anzeige dienen.

In der Abb. 5 sind die für verschiedene Zwecke konzipierten Geber zusammengestellt. Die zylindrischen Modelle können gestapelt werden, so daß die gleichzeitige Messung beider Neigungskomponenten vereinfacht wird.

Für die Meßreihen, über die im folgenden berichtet wird, stellte die Fa. Dipl.-Ing. E. FEY, Horemans-

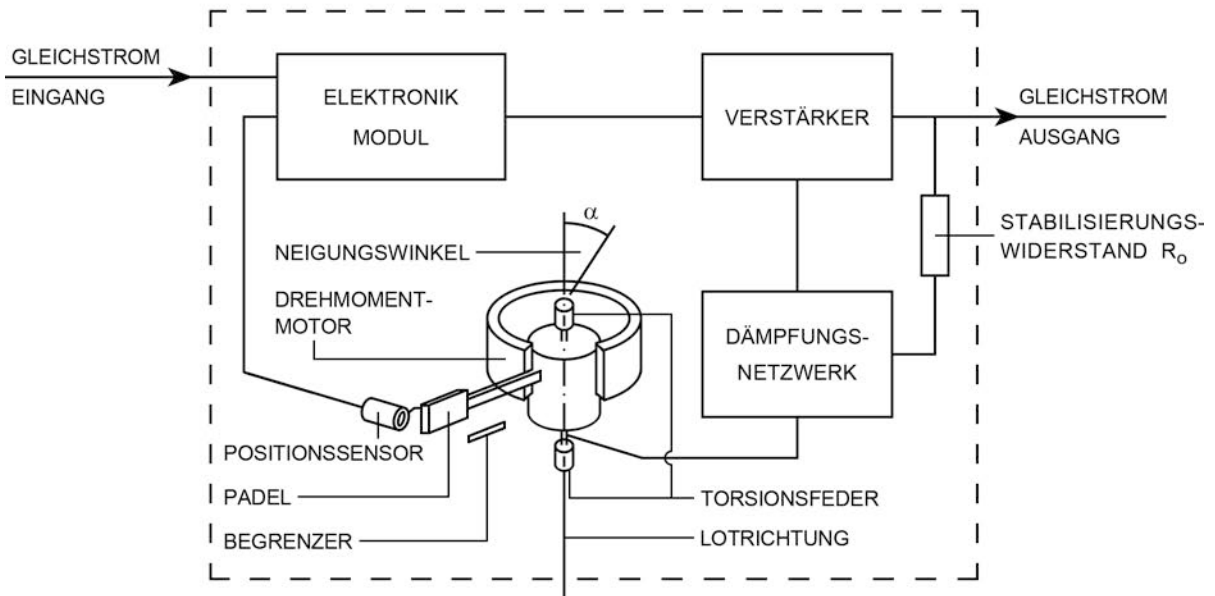
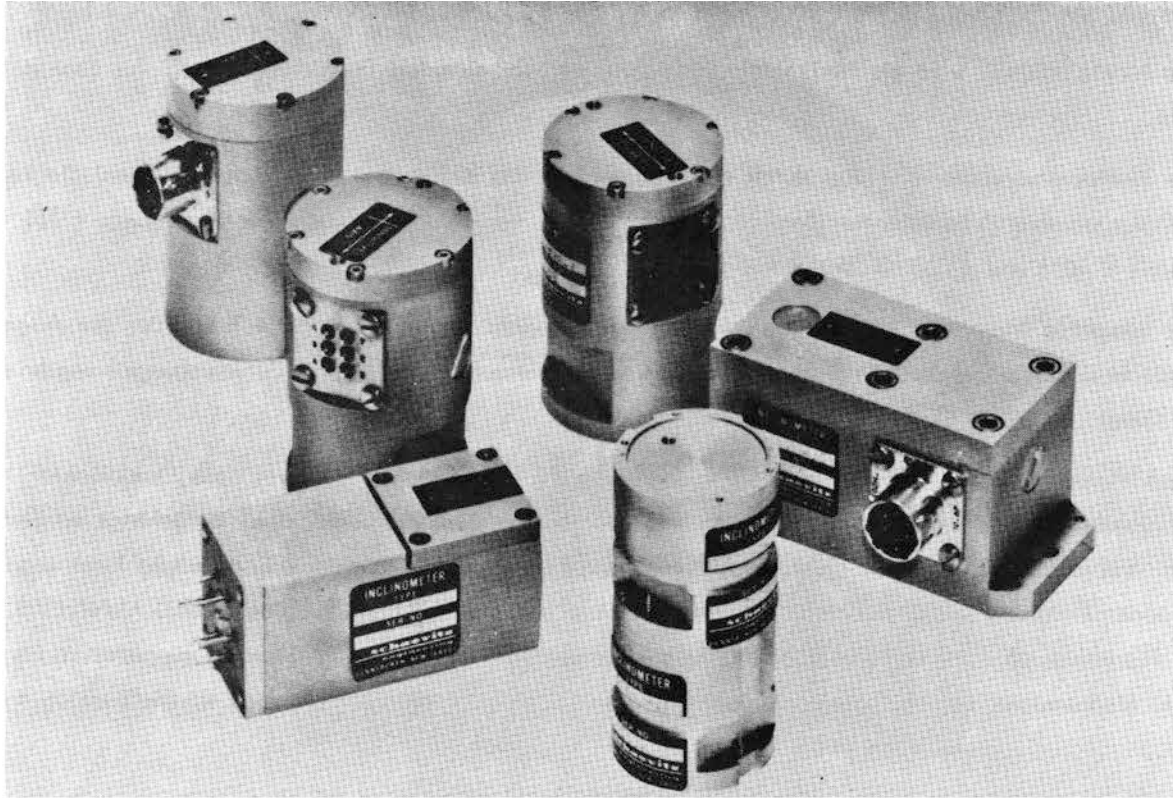


Abb. 5: "Inclinometer" der Firma SCHAEVITZ in verschiedenen Ausführungen mit einer Systemskizze.

straße 18, 8000 München 19, freundlicherweise einen Neigungsmesser des Typs LSOC, Ser.Nr. 1380, mit rechteckigem Gehäuse zur Verfügung. Als Ablesegerät wurde ein Digitalvoltmeter Datron, Modell 1057, benutzt.

3.3. Schwingsaitenneigungsmesser

Das Schwingsaiten-Meßverfahren, von MAIHAK entwickelt, benutzt die Eigenfrequenz einer schwingfähig im Meßwertempfänger eingespannten Meßsaite. Eine Änderung der Neigung des Gerätes verursacht eine Änderung der Dehnung und damit der Eigenfrequenz der Meßsaite, die zwischen Gehäuse und Pendel eingespannt ist. Die Saite schwingt im Feld eines Elektromagnetsystems und induziert in der Magnetspule eine elektrische Schwingung gleicher Frequenz, die über Kabel auf das Empfangsgerät übertragen und dort zur Meßwertbildung weiterverarbeitet wird.

Über das gleiche Elektromagnetsystem erfolgt vom Empfangsgerät die Erregung der Meßsaite. Die Saitenfrequenz folgt der Formel: $f = C \sqrt{\epsilon}$. Die Meßkonstante C ist bestimmt durch Länge, Masse und Elastizität der Saite. Die Dehnungsänderung ϵ der Saite ist proportional zur Neigungsänderung und daher bei einem konstruktiv festgelegten Aufnehmer maßgebend für die Frequenzänderung.

Die Unabhängigkeit der Frequenzänderung von anderen Faktoren wie Widerstandsänderungen und Spannungsschwankungen gewährleistet eine hohe Reproduzierbarkeit der Meßwerte und ermöglicht den ungestörten Meßwerttransport über größere Entfernungen.

Mit diesem Meßprinzip können neben der Neigung als Meßgröße auch Dehnung, Weg, Drehmoment, Kraft, Druck und Temperatur gemessen werden.

Es kommen zwei Schwingungssysteme zur Anwendung:

a) Intermittierend schwingende Meßsaite

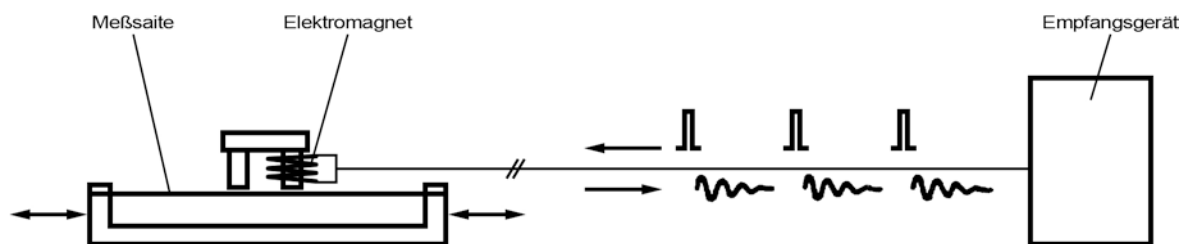


Abb. 6: Prinzip der intermittierend schwingenden Saite.

Die Meßsaite wird in einstellbaren Intervallen durch einen Gleichstromimpuls vom Empfangsgerät zur Schwingung angeregt. Die Messung erfolgt während des Ausschlagens der Meßsaite. Die Meßwerte werden in entsprechenden Intervallen (z.B. 1, 2, 4 oder 8 sek) am Empfangsgerät angezeigt bzw. an Punktdruckern oder Digitaldruckern registriert oder in Lochstreifen gespeichert.

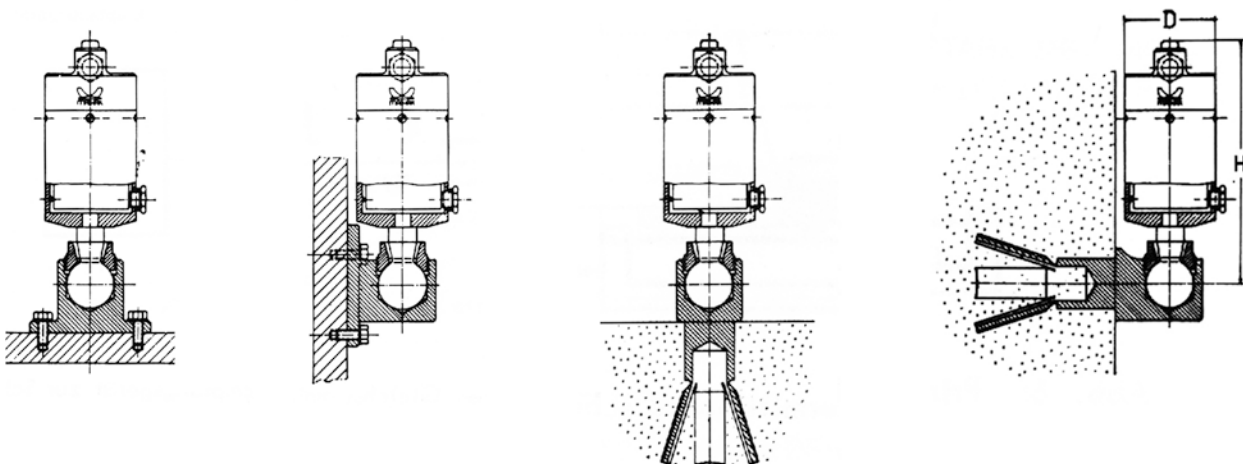
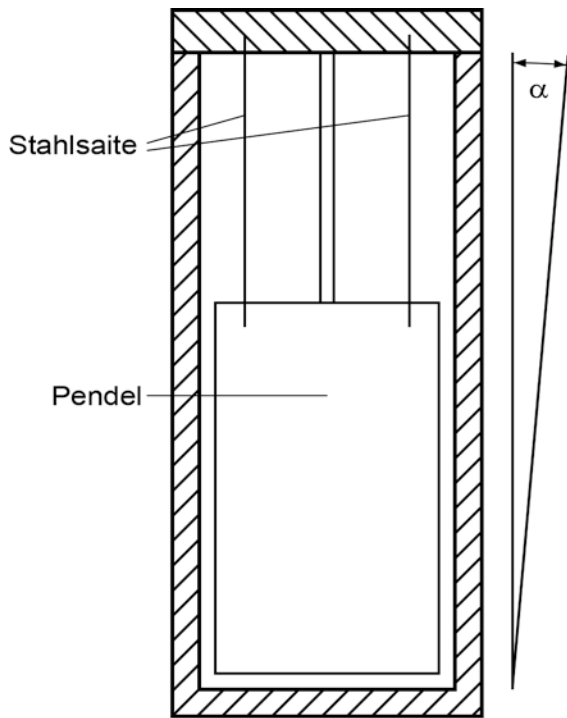


Abb. 8: Prinzipskizze, Bild und Anbringungsmöglichkeiten des MAIHAK Neigungsaufnehmers MDS 81.

Versuchsmessungen mit MAIHAK-Neigungsmessern sind von den Verfassern geplant, konnten jedoch bisher noch nicht durchgeführt werden. Zu gegebener Zeit wird darüber berichtet werden.

b) Dauerschwingende Meßsaite

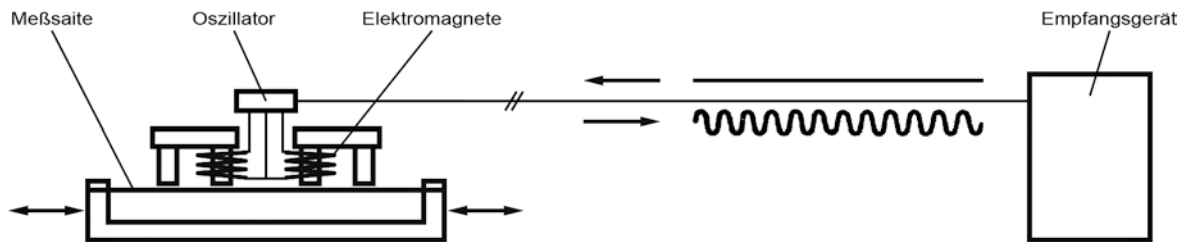


Abb. 7: Prinzip der dauerschwingenden Saite.

Die Meßsaite befindet sich in einem Oszillatorkreis, der vom Empfängergerät gespeist wird. Das System enthält zwei Elektromagnete, von denen einer fortlaufend die Meßsaite erregt (Erreger) und der andere fortlaufend die induzierten Schwingungen aufnimmt (Generator). Die Frequenz der Schwingungen wird kontinuierlich am Empfängergerät gemessen und direkt angezeigt oder registriert.

Die Meßwertgeber zeigen die Neigungsänderung jeweils in einer Meßrichtung an. MAIHAK bietet sechs Typen von Gebern an. Die Neigungsgeber MDS 81 a, b und c werden am Prüfobjekt angebracht. Die feste Verbindung erfolgt über Flansche oder Spreizanker. Die Neigungsgeber MDS 82 a, b und c werden im Beton eingegossen oder an Bauwerksteilen angebracht, die unter Flüssigkeitsdruck stehen. Die Bezeichnungen a, b und c beziehen sich auf den Meßbereich und die Genauigkeit.

3.4. Zusammenfassung

Die elektronischen Neigungsmesser, die für Präzisionsmessungen im Genauigkeitsbereich der klassischen Sekundenlibellen in Betracht kommen, lassen sich – soweit sie den Verfassern bekannt geworden sind – nach ihrem Funktionsprinzip in drei Gruppen einteilen.

Die Elektrolytlibellen gleichen in Aufbau und Funktionsweise vollständig den klassischen Röhren- bzw. Dosenlibellen. Die visuelle Ablesung wurde lediglich durch einen elektrischen Abgriff ersetzt.

Bei den Pendelneigungsmessern ist eine Masse so aufgehängt bzw. horizontal geführt, daß sie die Richtung der Schwerkraft anzeigt. Jede Positionsänderung der Masse erzeugt ein elektrisches Signal, das als Neigungsinformation ausgewertet wird.

Die Positionsänderung einer Masse ruft bei den Schwingsaitenneigungsmessern die Dehnung einer schwingfähig eingespannten Saite hervor. Die Dehnung ändert die Eigenfrequenz der Saite, die als Meßsignal verarbeitet, die gesuchten Neigungswerte liefert.

In Tabelle 3 sind die technischen Daten der Neigungsmesser, wie sie aus den Firmenprospekten entnommen werden können, zusammengestellt. Da die Prospektangaben sehr uneinheitlich und in vielen Fällen mißverständlich und unvollständig sind, wurde an alle Hersteller ein einheitlicher Fragebogen verschickt, der mehr Licht in die Leistungsfähigkeit der betrachteten Neigungsmesser bringen und einen objektiven Vergleich auf der Basis einheitlicher Bezeichnungen ermöglichen sollte. Die Ergebnisse dieser Umfrage sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Leider haben einige Firmen nicht alle Fragen beantwortet oder richtig interpretiert, so daß der Überblick lückenhaft bleiben mußte.

| | | | | | | |
|--|---|---|--|--|--|--|
| Neigungsmesser | TALYVEL | NIVELTRONIC | SCHAEVITZ Inclinometer | SCHMIDT EWB | KINEMATRICS Tiltmeter | MAIHAK |
| Hersteller | Rank, Taylor, Hobson (England) | Tesa S.A. Renens, Wyer AG, Winter- thur (Schweiz) | Schaevitz Engi- neering (USA) | Schmidt KG (Reinbek bei Hamburg) | Kinematics (Rockwell) (USA) | Maihak Hamburg |
| Typ | TALYVEL 2 | NIVELTRONIC | LSOC | EWB 2-100 2-achsig | TM 1 2-achsig | MDS 81 a, b, c MDS 82 a, b, c |
| Bereich | I : ± 8' II : ± 100" III : ± 25" | I : ± 150" II : ± 30" | ± 5 V ≅ ± 1° | RL - RR : ± 100" LL - LR : ± 100" | ± 7 V ≅ ± 36" | ± 10' ± 20' ± 40' |
| Ablösung | analog | analog | nach Wahl | analog | analog | digital |
| Maße Länge Breite Höhe (cm) Meßwertaufnehmer Anzeigerät | 18 x 18 x 22 18 x 18 x 22 | 20 x 8 x 20 Meßwertaufnehmer und Anzeige sind eine Einheit | 9 x 4 x 4 Multivoltmeter (von Schaevitz nicht lieferbar) | 5 x 5 x 4 30 x 20 x 23 | Ø 5 cm x 5 | Ø 10 cm x 28 Ø 10 cm x 28 Ø 10 cm x 28 20 x 30 x 18 |
| Gewicht Libelleneinheit (kg) Anzeigeeinheit (kg) | 1,2 3,8 | 4,1 | 0,4 1-5 | 0,4 5 | 4,5 5 | 3-4 7 |
| Funktionsprinzip | Vertikales Pendel | Vertikales Pendel | Horizontalpendel mit Drehmoment- motor | Elektrolyt | Elektrolyt | Schwingsaite |
| Stromquelle | Batterie / Netz | Batterie | Netz | Netz | Batterie / Netz | Batterie / Netz |
| Registriermöglichkeit | ja | ja | ja | nein | ja | ja |
| weitere Modelle der Herstellerrfirmen | TALYVEL 1 mit geändertem Meßbereich III: ± 50" | MINILEVEL LEVELTRONIC | verschiedene Grös- sen und Bereiche ± 1°, ± 3°, ± 14,5°, ± 30°, ± 90° | auch 1-achsig | verschied. Bereiche (± 7" - 20") als Bohr- lochnigungsmesser erhältlich | |

Tabelle 3: Übersicht über die verschiedenen Neigungsmesser

| Neigungsmesser | TALYVEL | NIVELTRONIC | SCHAEVITZ Inclinometer | SCHMIDT EWB | KINEMATRICS Tiltmeter | MAIHAK |
|---|------------------------------------|----------------------|----------------------------|---|--------------------------|------------------------------|
| Bereich | I: ± 8", II: ± 100", III: ± 25" | I: ± 150", II: ± 30" | ± 1° | ± 100" | ± 36" | ± 10' |
| Langzeitdrift des Nullpunktes bei konst. Temperatur | 1 - 2" / mehrere Monate | x) | 0,1% / Jahr ± 7" / Jahr | < 2" / Jahr ± 4" / Jahr | 0,1" / Monat | 0,7% / Jahr ± 4,2" / Jahr |
| Temperaturstabilität in % vom Meßbereich / °C | | | | | | |
| a) für den Nullpunkt | 0,2% / °C ± 0,1" (I) | x) | 0,05%/°C ± 3,6"/°C | 0,1%/°C ± 0,2"/°C | x) | ± 0,025% ± 0,2"/°C |
| Gebereinheit | 0,02%/°C ± 0,01" (I) | | | 0,1%/°C ± 0,2"/°C | | 0 |
| b) für den Skalenfaktor | | | | 0,2% / °C | | |
| Gebereinheit | | x) | 0,02% / °C | 0,2% / °C | 1% / °C | ± 0,025% / °C |
| Anzeigeinheit | | | | | 1% / °C | 0 |
| Linearität der Anzeige xx) | ± 2% ± ± 1" (I) | < ± 1,7% ± ± 1" (II) | ± 0,02% ± ± 1,4" | ≤ ± 10% ± ± 20" | ± 5% ± 3,6" | ± 0,5% ± ± 3" |
| Einfluß der Querneigung | x) | kein Einfluß | 0,5 V/g | 2% | 5% | 1% |
| Standardabweichung einer Ablesung | x) | ± 0,2" | 1,4" | ≤ 2% ± ± 4" | x) | ± 0,5% ± ± 3" |
| Ansprechempfindlichkeit xxx) | 0,1" | 0,2" | 0,04" | < 1% ± ± 2" | 0,002" | 0,3" |
| Reaktionszeit | 1 sek. | 3 sek. | x) | 2 sek. | x) | 1 sek. |
| Dämpfungsfaktor | x) | x) | 1 | 0,75 | 1,3 | x) |
| Eigenfrequenz | x) | x) | 10 Hz | 0,6 Hz | 1 Hz | 750 - 1000 Hz |
| Zulässiger Temperaturbereich | -5 bis +35 °C | x) | -18 bis +71 °C | Geber: -20 bis +70 °C Verstärker: 0 bis +45 °C | -30 bis +50 °C | -20 bis +60 °C |

x) keine Firmenangabe erhältlich

xx) größte Abweichung einer Einzelablesung von der Eichgeraden in ±% des Gesamtmeßbereiches

xxx) kleinste Neigungsänderung, die eine Anzeigeänderung hervorruft

Tabelle 4: Technische Einzelheiten und Spezifikationen nach Firmenangaben für die behandelten Neigungsmesser.

4. UNTERSUCHUNGEN AN ELEKTRONISCHEN NEIGUNGSMESSERN

Beginnend mit der Arbeit von MONTAG [19] im Jahre 1964 sind eine Reihe von Aufsätzen von Untersuchungen an elektronischen Neigungsmessern in der geodätischen Fachliteratur veröffentlicht worden.

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse dieser Arbeiten, die sich ausschließlich auf die "Elektronische Libelle" TALYVEL beziehen, zusammengefaßt und durch eigene Untersuchungen an verschiedenen Libellen ergänzt werden

4.1. Meßanordnung und Auswertemodell

Die eigenen Untersuchungen wurden teils im Geodätischen Labor der Hochschule der Bundeswehr München mit den dort zur Zeit noch bescheidenen Hilfsmitteln (Legebrett der Fa. Lummert, Berlin), teils in der Klimakammer des Instituts für Luft- und Raumfahrttechnik der Hochschule der Bundeswehr München, größtenteils aber an der TU München (Feinlibellenprüfer, VEB Freiburger Präzisionsmechanik, des Instituts für Astronomische und Physikalische Geodäsie und Präzisionslegebrett des Instituts für Geodäsie) durchgeführt.

Die Verfasser sind Herrn Prof. Dr. Sigl und Herrn Prof. Dr. Schnädelbach sehr zu Dank verpflichtet, daß sie die Arbeitsmöglichkeit in ihren Räumen gewährt und die Einrichtungen ihrer Institute für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt haben.

Die zum Teil recht einfachen Meßeinrichtungen haben bei der Interpretation der Ergebnisse in einigen Fällen zu Schwierigkeiten geführt, die aber mit Hilfe zusätzlicher Untersuchungen der Prüfeinrichtungen behoben werden konnten.

Insbesondere war ein sorgfältiger Vergleich der Mikrometerschraube des Feinlibellenprüfers notwendig, um eine zuverlässige Aussage über die stellenbedingte Veränderlichkeit der Angabe der untersuchten Neigungsmesser zu ermöglichen. Bei diesen Vergleichsmessungen wurde die Neigung des Freiburger Libellenprüfers in vier Meßreihen in Sekundenschritten geändert und mit einem Laser-Interferometer ausgemessen. Die interferometrische Meßanordnung erlaubt eine Auflösung der Neigung in Schritten von $0,032''$. Die Ausgleichung der Meßreihen wurde nach dem linearen Modell, das weiter unten beschrieben ist, durchgeführt. Es zeigte sich, daß der Gang der Kippschraube des Libellenprüfers zwischen den Werten $100''$ und $125''$ eine Unstetigkeitsstelle besitzt und im übrigen Bereich mit ausreichender Genauigkeit als linear betrachtet werden kann. Eine neue Ausgleichung, die ohne den Bereich $100''$ bis $125''$ durchgerechnet wurde, führte zu der Standardabweichung $\pm 0,039''$ ($f = 560$) für eine Ablesung, bezogen auf einen linearen Schraubengang. Für den Unstetigkeitsbereich wurde eine Sprungkonstante angesetzt, die den Wert $+ 0,32''$ annahm.

Diese Messungen haben gezeigt, daß der Libellenprüfer für die Untersuchung der Neigungsgeber geeignet ist, wenn der Unstetigkeitsbereich gemieden wird.

Im Rahmen der Untersuchungen, über die hier berichtet werden soll, wurden von August 1976 bis Juni 1977 insgesamt 160 Beobachtungsreihen durchgeführt, die jeweils aus einer Hin- und einer Rückmessung bestehen. Wenn zwei Meßreihen nacheinander für denselben Untersuchungszweck beobachtet wurden, so wurde die zweite Reihe stets am entgegengesetzten Ende der Teilung begonnen (Abb. 9). Auf diese Weise wurde der

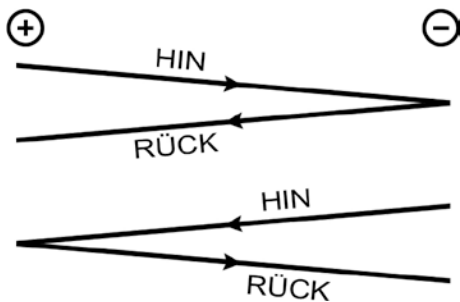


Abb. 9: Beobachtungsanordnung bei zwei nacheinander durchgeführter Meßreihen.

Umkehrpunkt abwechselnd an den positiven und den negativen Rand des Meß- bzw. Skalenbereiches gelegt. Bei der Auswertung wurden solche Reihen dann zusammengefaßt und als eine Reihe weiterbehandelt.

Bei den ersten Meßreihen wurde der Prüfer um runde Werte (1 TE, 2 TE oder 5 TE) geneigt und am Prüfling der Zeigerstand abgelesen, wobei ein Zehntel des TE (Teilungsintervall) geschätzt wurde.

Bei den Messungen mit dem Freiburger Libellenprüfer konnte von der 7. Reihe an die Ablesegenauigkeit dadurch etwas verbessert werden, daß die Neigung um ganze TE des Prüflings geändert und die auf 0,5" geteilte Trommel abgelesen wurde. Sämtliche Ergebnisse beziehen sich, soweit keine andere Angabe gemacht wird, auf den empfindlichsten Meßbereich des Gerätes.

Als funktionales Modell zur Bestimmung der mittleren Libellenangabe erwies sich nach einer Anzahl von Proberechnungen folgendes lineares Modell als geeignet, das dann für alle Berechnungen zugrunde gelegt wurde.

| | | |
|--|--------------------------------|-------------|
| $l_{11} + v_{11} = a$ | $+ p t_{11} + d z_1$ | |
| $l_{12} + v_{12} = a$ | $+ p t_{12} + d z_2$ | |
| ⋮ | ⋮ | Hinmessung |
| ⋮ | ⋮ | |
| $l_{1n_1} + v_{1n_1} = a$ | $+ p t_{1n_1} + d z_{n_1}$ | |
| | | |
| $l_{21} + v_{21} = a + \Delta a_2$ | $+ p t_{21} + d z_{n_1+1}$ | |
| $l_{22} + v_{22} = a + \Delta a_2$ | $+ p t_{22} + d z_{n_1+2}$ | |
| ⋮ | ⋮ | Rückmessung |
| ⋮ | ⋮ | |
| $l_{2n_2} + v_{2n_2} = a + \Delta a_2$ | $+ p t_{2n_2} + d z_{n_1+n_2}$ | |
| | | |
| $l_{31} + v_{31} = a + \Delta a_2 + \Delta a_3 + p t_{31} + d z_{n_1+n_2+1}$ | | |
| $l_{32} + v_{32} = a + \Delta a_2 + \Delta a_3 + p t_{32} + d z_{n_1+n_2+2}$ | | |
| ⋮ | ⋮ | Hinmessung |
| ⋮ | ⋮ | |

l ... Einstellwert am Neigungsmesser

v ... Verbesserung (Modell- und Ablesefehler)

a ... Additionskonstante

Δa ... Änderung von a beim Übergang zur nächsten Teilreihe

$1/p$... mittlere Angabe des Neigungsmessers

t ... Ablesung am Libellenprüfer

d ... zeitproportionale Änderung der Ablesung und des Versuchsaufbaus

z ... durchlaufende Nummer der Messung

n_i ... Anzahl der Beobachtungen in einer Teilreihe

Es wurden bewußt keine Messungen durch Mittelbildung zusammengefaßt, um möglichst viele Einzeleinflüsse sichtbar zu machen. Zunächst wurde jede Meßreihe, bestehend aus Hin- und Rückmessung, ausgeglichen. Danach wurden in einem zusätzlichen Berechnungsgang alle Reihen, die am gleichen Tag unter gleichen Bedingungen beobachtet worden waren, in eine gemeinsame Ausgleichung eingeführt.

4.2. Die Meßgenauigkeit

Ein Maß für die Genauigkeit der elektronischen Neigungsmesser stellt die Standardabweichung s_0 dar, die bei den Ausgleichungen im linearen Modell nach 4.1. aus den Verbesserungen geschätzt wird. Die Schätzung enthält neben den mittleren Ablesefehlern bzw. Einstellfehlern an Neigungsmesser und Libellenprüfer die mittleren Systemfehler (Wiedergabefehler) dieser beiden Komponenten und den (systematischen) Modellanpassungsfehler.

In einigen Veröffentlichungen wird in der Annahme, daß der systematische Anteil an den Verbesserungen den größten Beitrag liefert, der durchschnittliche Fehler als Genauigkeitsmaß bevorzugt. Auf diesem Genauigkeitsmaß basiert auch die klassische Gütetabelle (Tabelle 1) für Sekundenlibellen nach WANACH.

Bei den Libellenuntersuchungen unter Laborbedingungen mit dem Feinlibellenprüfer der VEB Freiburger Präzisionsmechanik, für den der Hersteller eine Genauigkeit von $\pm 0,2''$ angibt, wurden aus den Residuen des linearen Modells nach 4.1. die in Tabelle 5 Spalte 4 aufgeführten Standardabweichungen s_0 für eine Einzelablesung berechnet.

Da bei den Messungen an der Anzeigeeinheit des Neigungsmessers ein Teilstrich eingestellt wurde und die Ablesung am Libellenprüfer erfolgte, muß s_0 die gesamte Ungenauigkeit des Libellenprüfers enthalten. Offensichtlich ist dieser Prüfer, wie schon in 4.1. erläutert wurde, viel leistungsfähiger als nach der Firmenangabe erwartet werden darf.

Neben den zufälligen Fehlern der Meßanordnung und der Meßgeräte enthält s_0 alle systematischen Effekte, die nicht durch das lineare funktionale Modell erfaßt werden können.

Dies sind insbesondere die Nichtlinearität der Kennlinie der Libelle und der Mikrometerschraube des Prüfers, Verlagerungen des Nullpunktes, Veränderungen der Zuordnung Prüfling und Prüfer, sowie Bewegungen des Beobachtungspfeilers, sofern diese Einflüsse sich nicht proportional zur Meßdauer verhalten.

Aufgrund bekannter Untersuchungen [27], [10] muß erwartet werden, daß die Kennlinie der elektronischen Neigungsmesser den größten systematischen Anteil bei Benutzung eines linearen Modells liefert. Auf diese Problematik wird im nächsten Abschnitt gesondert eingegangen.

Eine weitere Möglichkeit, die Meßgenauigkeit zu schätzen, besteht mit Hilfe der Beobachtungsdifferenzen aus Hin- und Rückmessung. Diese Differenzen sind weitgehend frei von den schon genannten systematischen

Fehlereinflüssen, die ihre Ursache in der Nichtlinearität der Kennlinie haben. Sie enthalten jedoch alle Systematiken, die sich zeitproportional verhalten. Um dies zu berücksichtigen, wurden Geradenausgleichungen mit den Differenzen als verbesserungsbedürftige Beobachtungen durchgeführt.

$$d + v = a + b x$$

d ... Rück- Hinmessung, Differenz der Ablesungen am Libellenprüfer x ... Eingestellter Wert am Neigungsmesser
a, b ... Modellparameter

v ... Verbesserung

Die nach diesem Verfahren geschätzten Standardabweichungen \bar{s}_0 für eine Einzelmessung sind in Spalte 6 der Tabelle 5 aufgeführt. Sie sind wohl als mittlere Grenzwerte aufzufassen, die nur unter Laborbedingungen als Meßgenauigkeit zu erzielen sind, vorausgesetzt, daß die wahre Kennlinie der Libelle benutzt wird.

| Neigungs- messer | mittlere Angabe ρ ["] | Anzahl der Meß- reihen | Standard- abweich. s_0 ["] | Freiheits- grad | Standard- abweich. \bar{s}_0 ["] | Freiheits- grad |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------|--|--------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| TALYVEL A | 1 | 11 | $\pm 0,141$ | 995 | $\pm 0,077$ | 552 |
| TALYVEL B | 1 | 1 | 0,179 | 198 | 0,085 | 98 |
| TALYVEL C | 1 | 1 | 0,136 | 198 | 0,074 | 98 |
| TALYVEL D | 1 | 1 | 0,080 | 198 | 0,064 | 98 |
| TALYVEL A | 4 | 2 | 0,427 | 204 | 0,280 | 196 |
| NIVELTRONIC | 2 | 8 | 0,062 | 509 | 0,044 | 270 |
| NIVELTRONIC | 10 | 2 | 0,172 | 118 | 0,123 | 116 |
| SCHAEVITZ | 0,7 | 6 | 0,114 | 411 | 0,066 | 219 |
| EWB RL - RR | 10 | 3 | 1,495 | 114 | 0,185 | 56 |
| EWB LL - LR | 10 | 3 | 2,006 | 110 | 0,274 | 55 |

Tabelle 5: Schätzungen der Meßgenauigkeit der untersuchten Neigungsmesser

Mit dem F-Test und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % lassen sich die Werte \bar{s}_0 aus Tabelle 5 in folgender Weise gruppieren:

Der mit deutlichem Abstand genaueste Neigungsmesser ist das NIVELTRONIC mit der Standardabweichung $\bar{s}_0 = \pm 0,044''$. Untereinander gleich aber signifikant größer als beim NIVELTRONIC sind die Standardabweichungen der SCHAEVITZ und der TALYVEL D. Die Zusammenfassung ergibt einen Wert von $\bar{s}_0 = \pm 0,065''$ für diese beiden Neigungsmesser.

Wiederum signifikant größer ist die Standardabweichung $\bar{s}_0 = \pm 0,077''$ zu der die Einzelwerte für die TALYVEL A, B und C zusammengefaßt werden können. Die Differenz zwischen \bar{s}_0 und s_0 bringt den systematischen Fehler zum Ausdruck, der entsteht, wenn mit einem mittleren Wert für die Libellenangabe im ganzen Meßbereich gearbeitet wird.

Die Ergebnisse der EWB liegen im Rahmen dessen, was bei einer 10"-Libelle zu erwarten ist. Überraschend

niedrig ist jedoch ihre Standardabweichung \bar{s}_0 , die vermuten läßt, daß eine erhebliche Genauigkeitssteigerung erzielbar ist, wenn bei gesteigerter Auflösung die Kennlinie der EWB besser erfaßt und bei der Auswertung berücksichtigt wird.

Die Meßreihen im Bereich 2 mit der TALYVEL A ($p \approx 4''$) und im Bereich 1 mit dem NIVELTRONIC ($p \approx 10''$) zeigen erneut die Überlegenheit des NIVELTRONIC-Neigungsmessers. Bei der Beurteilung der Standardabweichungen ist zu berücksichtigen, daß am Neigungsmesser die Teilstriche eingestellt wurden und die Zehntelschätzung am Libellenprüfer erfolgte.

4.3. Stellenbedingte Abhängigkeit der Angabe

Alle Auswertungen der Beobachtungsreihen erfolgten nach dem in 4.1. beschriebenen linearen funktionalen Modell. Es wurde somit stets vorausgesetzt, daß ein mittlerer Wert für die Angabe der Neigungsmesser ausreicht, oder anders formuliert, daß die Kennlinie der Geräte eine Gerade ist.

Die Unzulänglichkeiten dieses linearen Modells schlagen sich als Modellfehler in den Verbesserungen der Ausgleichungen nieder. Die Analyse dieser Verbesserungen erlaubt daher einen Rückschluß auf die wahre Form der Kennlinie.

In Abbildung 10 sind für die TALYVEL A, Bereich $\pm 25''$, die Verbesserungen von vier Ausgleichungen über der Ablesestelle aufgetragen. Die zugehörigen Beobachtungsreihen wurden unter gleichen Meßbedingungen und nach demselben Versuchsplan (Abb. 9) durchgeführt. In jeder der Reihen ist deutlich das systematische Verhalten der Verbesserungen erkennbar, dessen Erscheinungsbild zwar bei allen Reihen sehr ähnlich aber doch unterschiedlich ausgeprägt ist.

Versuchsrechnungen haben gezeigt, daß ein Polynom 4. Grades ausreicht, die Systematiken auszudrücken und ein zufälliges Erscheinungsbild der dann verbleibenden Verbesserungen zu erzeugen. Dieses Vorgehen kann jedoch nicht generell empfohlen werden, da sich die Parameter des Polynommodells von Meßreihe zu Meßreihe signifikant unterscheiden, ohne daß es möglich ist, aus dem Meßprozeß heraus einen Grund dafür anzugeben.

Die Standardabweichung einer Beobachtung beträgt nach Tabelle 5 für das lineare Modell bei der TALYVEL A $s_0 = \pm 0,14''$ ($f = 552$). Diese Genauigkeit dürfte von wenigen Ausnahmen abgesehen ausreichen. Bei Sonderanwendungen mit höheren Genauigkeitsanforderungen legen die Abbildungen es nahe, die Kennlinie durch zwei Geradenstücke anzunähern, die bei $-7,5''$ zusammenstoßen, oder, sofern möglich, für die Messungen nur den positiven Bereich zu verwenden.

Eine Steigerung der Genauigkeit auf eine Standardabweichung unter $0,1''$ wird jedoch nicht möglich sein, da die dafür notwendige Kennlinienstabilität nicht gegeben ist.

Die Abbildung 11 zeigt vier Meßreihen, die unter denselben Bedingungen beobachtet und ausgewertet worden sind. Hier handelt es sich um vier verschiedene Neigungsgeber vom Typ TALYVEL, die in Verbindung mit demselben Anzeigegerät untersucht wurden. Bei allen vier Geräten zeigen sich ähnliche Systematiken, die aber verschieden stark ausgebildet sind. Dies legt den Schluß nahe, daß möglicherweise ein Teil der systematischen Abweichungen von der Linearität vom Anzeigegerät verursacht wird.

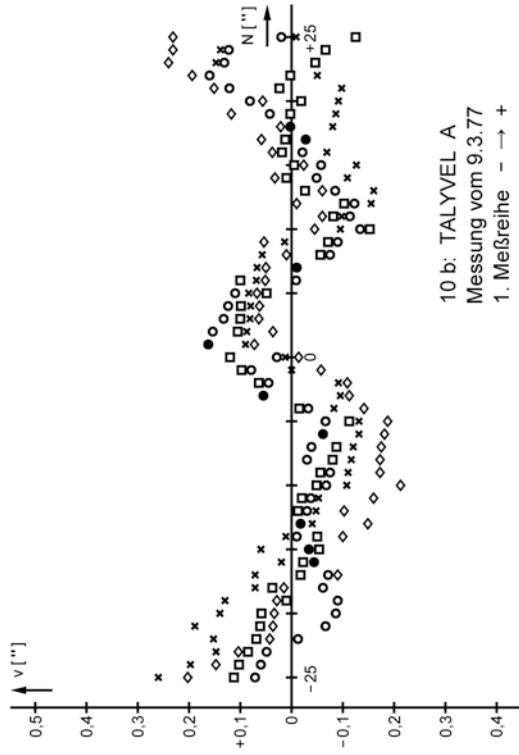
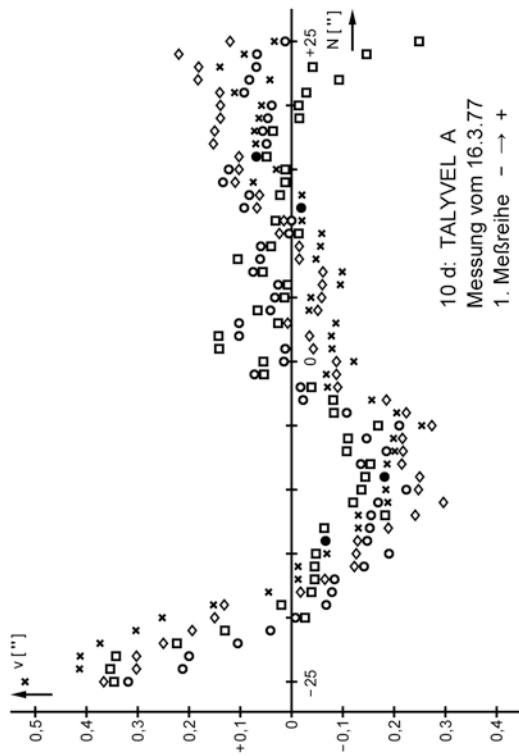
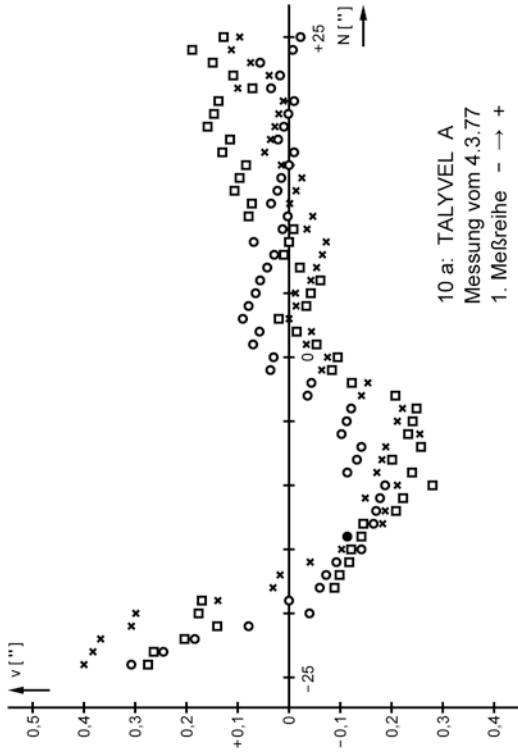
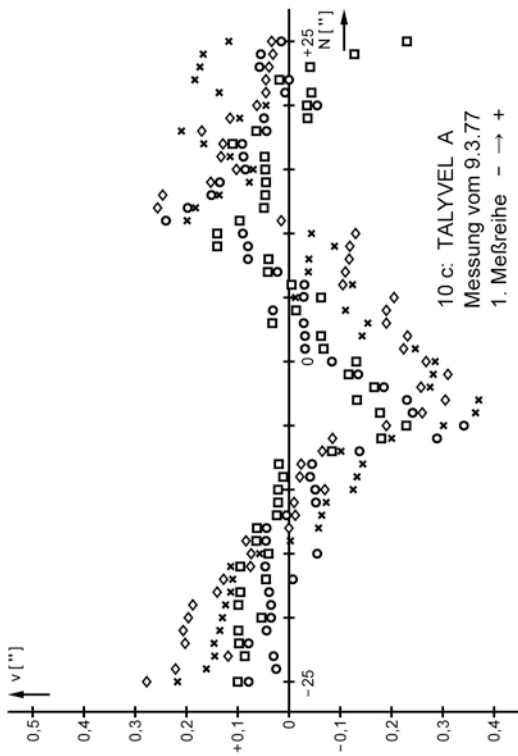


Abb. 10: Darstellung der Verbesserungen (v) nach der Ausgleichung mit linearem funktionalem Modell über der Neigung (N) für vier Untersuchungen desselben Neigungsaufnehmers vom Typ TALYVEL. Es sind jeweils alle drei oder vier zusammengehörenden Meßreihen in einem Guß ausgeglichen worden.

x 1. Meßreihe o 2. Meßreihe □ 3. Meßreihe ◇ 4. Meßreihe ● mehrere Meßwerte fallen zusammen

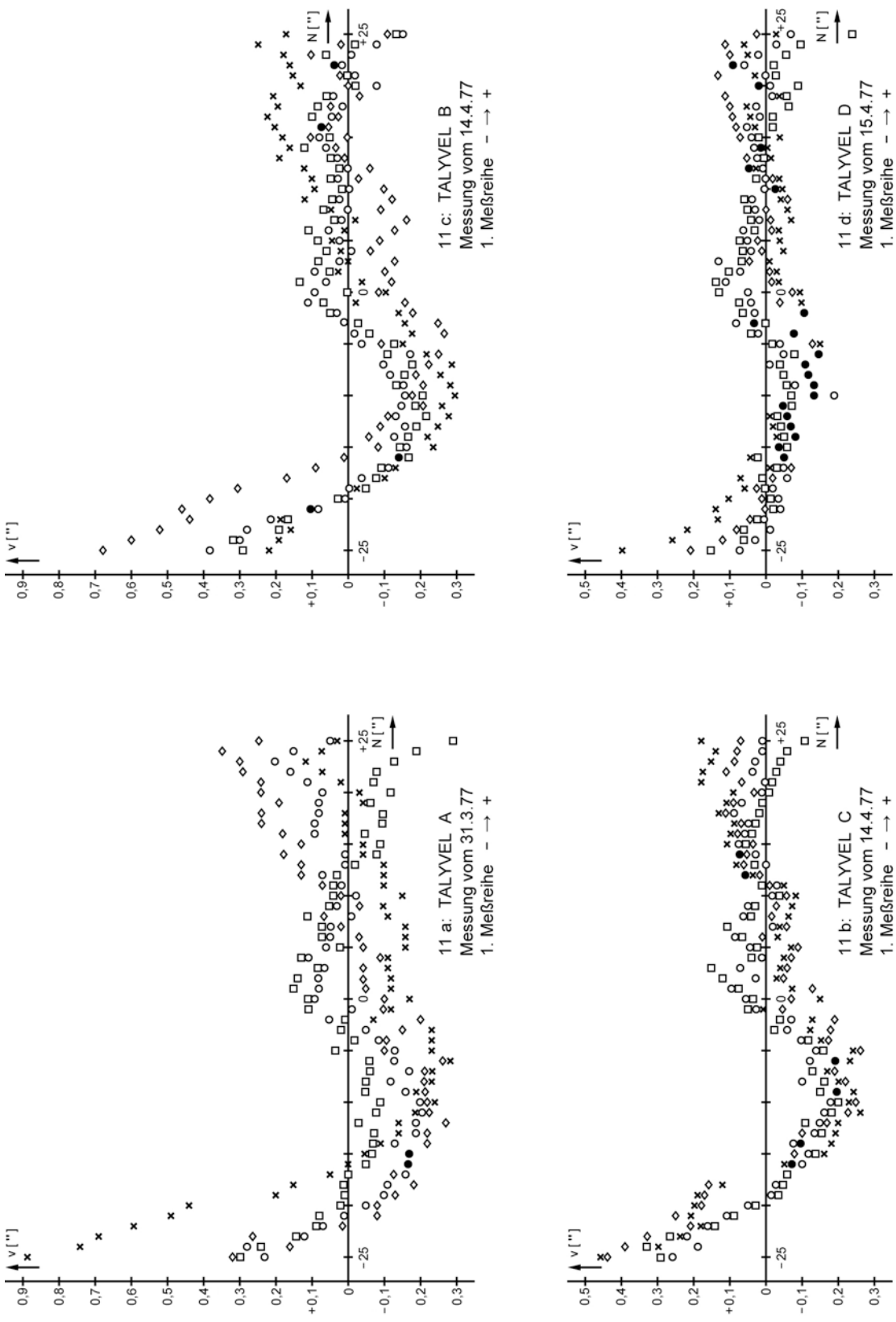


Abb. 11: Darstellung der Verbesserungen (v) nach der Ausgleichung mit linearem funktionalem Modell über der Neigung (N) für vier Neigungsaufrnehmer vom Typ TALYVEL. Es wurden jeweils vier unmittelfar durchgeführte Meßreihen nach Abb. 9 in einem Guß ausgeglichen.

* 1. Meßreihe o 2. Meßreihe □ 3. Meßreihe ◇ 4. Meßreihe ● mehrere Meßwerte fallen zusammen

Bestätigt wird diese Hypothese durch die Darstellung der Restverbesserungen von zwei Meßreihen der TALYVEL A im Meßbereich $\pm 100''$. Bei der Wahl dieses Meßbereichs beträgt die Angabe etwa $4''$. Die Ablesungen am Anzeigegerät werden daher einschließlich ihrer zufälligen und systematischen Fehler mit dem Faktor vier multipliziert. Ein Vergleich der Abbildungen 10 und 11 mit Abbildung 12 zeigt, daß es sich hier wieder um dasselbe systematische Erscheinungsbild handelt, das nur mit dem Faktor vier überhöht dargestellt ist.

Es liegen nach diesen Darlegungen gute Gründe dafür vor, anzunehmen, daß die Kennlinien der vier untersuchten TALYVEL-Neigungsaufnehmer weitgehend linear arbeiten, daß jedoch die Anzeigeeinheit, die benutzt wurde, die in den Graphiken erkennbaren Abweichungen von der Linearität erzeugt. Weitere Untersuchungen mit verschiedenen Anzeigeeinheiten und derselben Gebereinheit zur endgültigen Klärung dieser Problematik sind in Vorbereitung.

MONTAG [19] untersuchte den Bereich $\pm 50''$ der TALYVEL 1 und führte getrennte Bestimmungen der mittleren Angabe für den Bereich des positiven und negativen Ausschlags durch. Er kam dabei zu dem Ergebnis, daß keine wesentlichen Differenzen zwischen den für die Teilbereiche bestimmten Angabewerten zu verzeichnen sind und daher für den ganzen Meßbereich mit einem festen Skalenwert zu arbeiten ist.

SOLTAU [27] konnte dieses Ergebnis nicht bestätigen. Nach ähnlichen Untersuchungen einer TALYVEL 1 im Bereich $\pm 50''$ zeigte er an Hand des systematischen Verlaufs der Verbesserungen, bezogen auf einen Angabewert für den gesamten Bereich, daß ein signifikanter Unterschied zwischen den Bereichen mit positivem und mit negativem Ausschlag besteht. Die Berücksichtigung dieses Unterschieds führte zu einer deutlichen Genauigkeitssteigerung bei der Messung kleiner Neigungen.

MILOVANOVIC [16] untersuchte ebenfalls die stellenbedingte Veränderlichkeit der Angabe einer TALYVEL 1. Er fand dabei, daß die Verbesserungen bezogen auf eine mittlere Angabe nicht größer als die Ablesefehler sind, die durch Schätzung der Zeigerstellung bei einem Angabewert von $2''$ entstehen.

Über die Untersuchung der Bereiche $\pm 25''$ und $\pm 100''$ einer TALYVEL 2 berichteten GLISSMANN / WENZEL [10]. Sie hatten durch Digitalisierung der Anzeige die Auflösung gesteigert und erhielten so Meßwerte, die praktisch frei von Ablesefehlern waren. Die Restverbesserungen nach einer Ausgleichung mit linearem Ansatz im Bereich $\pm 100''$ zeigten stark systematisches Verhalten. Durch den Ansatz eines Polynoms 3. Grades konnte die Abhängigkeit der Angabe von der Meßstelle erfaßt werden. In diesem Modell betrug der mittlere Fehler einer Ablesung $s_0 = \pm 0,12''$ gegenüber $\pm 0,32''$ bei linearem Ansatz.

Für das NIVELTRONIC, Meßbereich $\pm 30''$, sind in Abbildung 13 die Verbesserungen von fünf Meßreihen dargestellt. Das bei der Ausgleichung benutzte lineare Modell gibt für diesen Neigungsmesser offensichtlich die Kennlinie sehr gut wieder. Das Erscheinungsbild ist nur sehr schwach von Systematiken geprägt. Der mittlere Fehler einer Einzelablesung von $s_0 = \pm 0,062''$ ($f = 509$) läßt sich durch Erweiterungen des funktionalen Modells nicht mehr herabdrücken. Bei dem untersuchten NIVELTRONIC kann im ganzen Bereich auch bei höchsten Ansprüchen mit einem konstanten Wert für die Angabe gearbeitet werden.

Die Abbildung 14 zeigt die Verbesserungen einer Meßreihe mit dem NIVELTRONIC im Bereich $\pm 150''$, in dem ein Teilintervall der Skala einer Neigung von $10''$ entspricht. Die aus der Darstellung erkennbare hohe Genauigkeit war nur zu erzielen, weil am Neigungsmesser die Teilstriche eingestellt und am Libel-

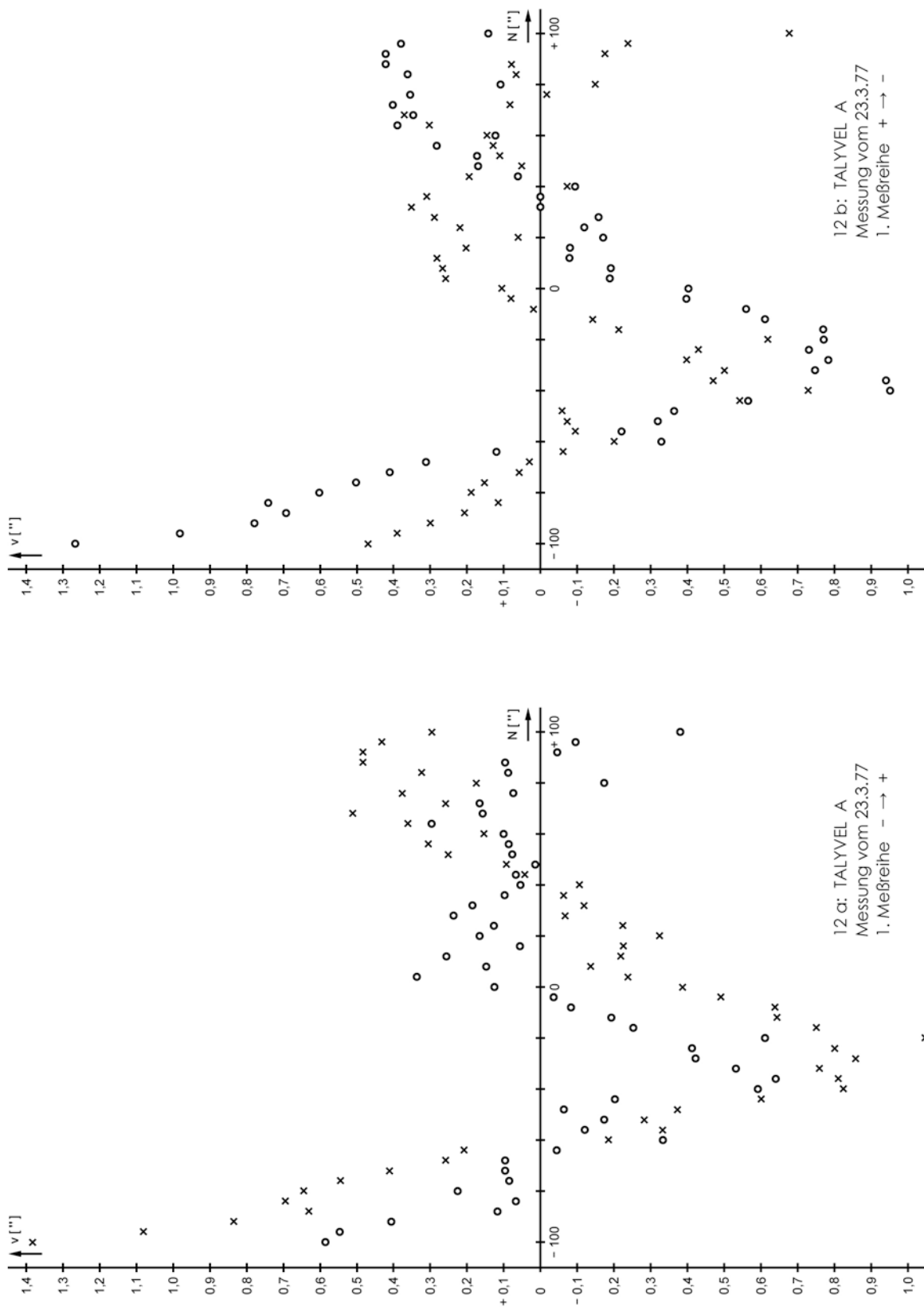


Abb. 12: Darstellung der Verbesserungen (v) nach der Ausgleichung mit linearem funktionalem Modell über der Neigung (N) für zwei Untersuchungen desselben Neigungsauflnehmers vom Typ TALYVEL. Die 1. und 2. Meßreihe wurde jeweils in einem Guß ausgeglichen.

x 1. Meßreihe o 2. Meßreihe • beide Meßwerte fallen zusammen

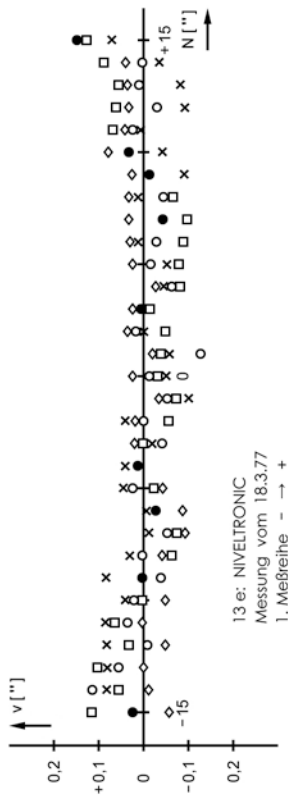
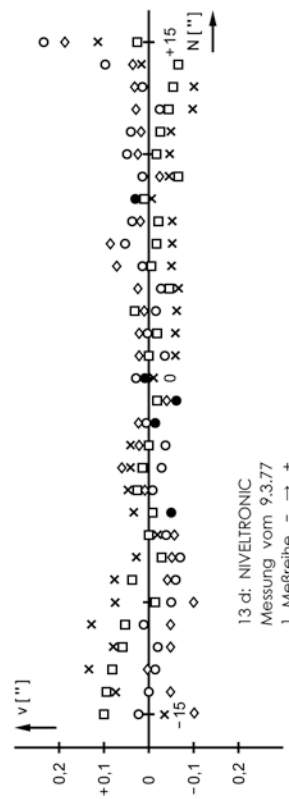
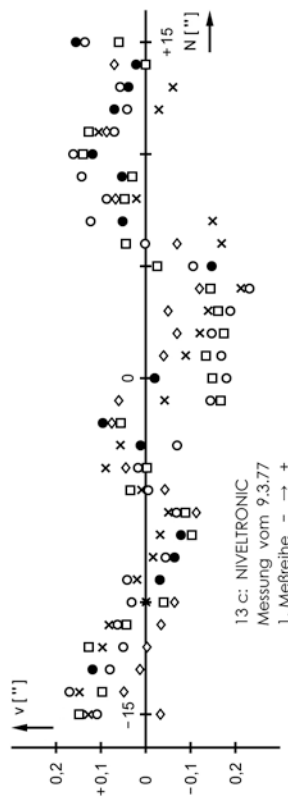
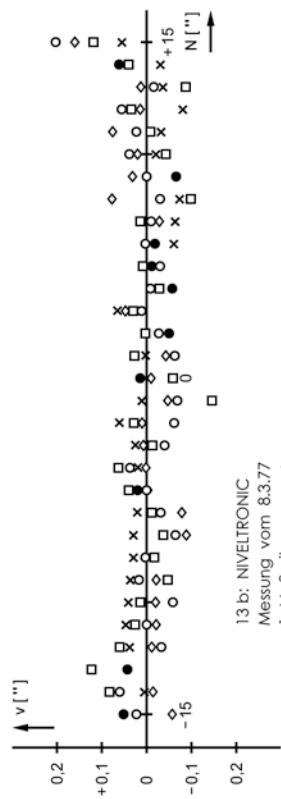
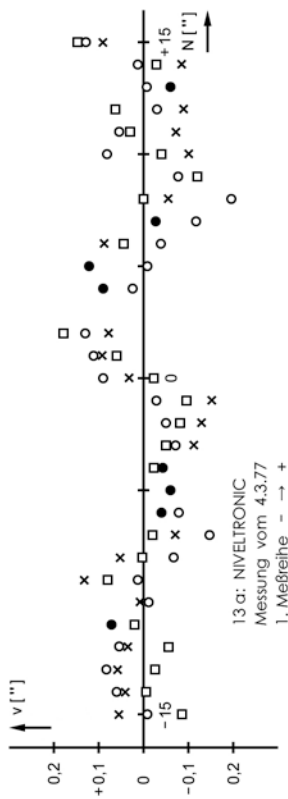


Abb. 13: Darstellung der Verbesserungen (v) nach der Ausgleichung mit linearem funktionalem Modell über der Neigung (N) für fünf Untersuchungen des Neigungsmessers vom Typ NIVELTRONIC. Es sind jeweils alle drei oder vier zusammengehörenden Meßreihen in einem Guß ausgeglichen worden.

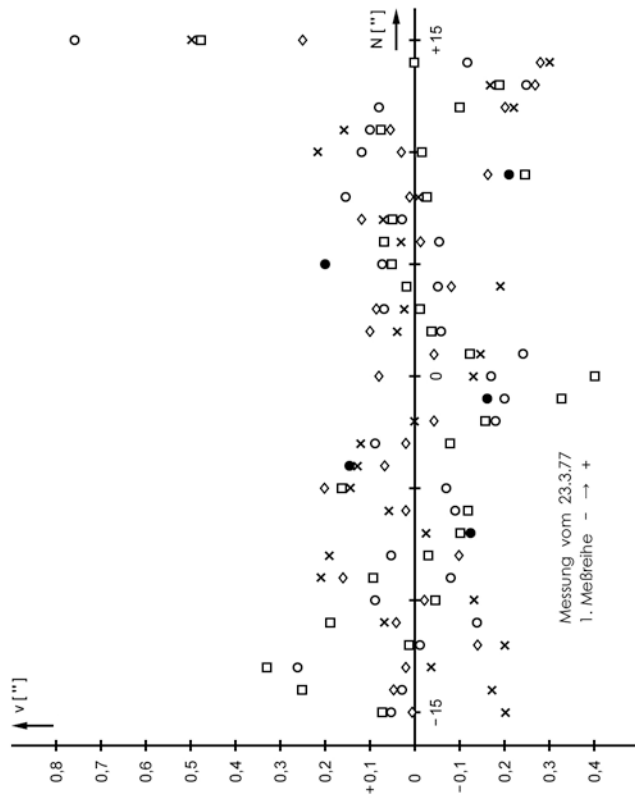


Abb. 14: Darstellung der Verbesserungen (v) nach der Ausgleichung mit linearem funktionalem Modell über der Neigung (N) für eine Untersuchung des Neigungsmessers vom Typ NIVELTRONIC. Alle vier dargestellten Meßreihen wurden in einem Guß ausgeglichen.

x 1. Meßreihe o 2. Meßreihe □ 3. Meßreihe ◇ 4. Meßreihe ● mehrere Meßwerte fallen zusammen

lenprüfer die Ablesungen durchgeführt wurden. Die dargestellten Verbesserungen beinhalten daher im wesentlichen den Einstellfehler. Sie sind offensichtlich frei von Systematiken.

Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse von TALYVEL und NIVELTRONIC führt zu dem nicht erwarteten Ergebnis, daß das NIVELTRONIC sowohl hinsichtlich seiner Systemgenauigkeit (Tabelle 5) als auch hinsichtlich der Linearität und Reproduzierbarkeit der Kennlinie der TALYVEL überlegen ist. Es wäre interessant, weitere NIVELTRONIC-Neigungsmesser zu untersuchen, um eine Aussage darüber zu ermöglichen, ob die Eigenschaften des untersuchten Gerätes repräsentativ sind.

Aus dem Meßbereich $\pm 1^\circ$ des untersuchten SCHAEVITZ-Neigungsmessers sind in Abbildung 15 sechs Ausschnitte zusammengestellt. Die ersten beiden Darstellungen 15a und 15b zeigen je einen kleinen Meßbereich mit Ablesungen von Sekunde zu Sekunde. Bei 15c erfolgten die Messungen in Zweisekundenintervallen und schließlich bei 15d, 15e und 15f wurde in Fünfsekundenschritten der Bereich von ca. $-120''$ bis $+50''$ untersucht.

Bei den Messungen erfolgte die Ablesung der Neigungswerte mit einem handelsüblichen Digitalvoltmeter, das vier Nachkommastellen anzeigt. Einer Sekunde Neigungsänderung entsprachen 14 Einheiten der vierten Nachkommastelle. Wegen dieser günstigen Auflösung wurde bei den SCHAEVITZ-Untersuchungen der Libellenprüfer um feste Neigungswerte gekippt und am Digitalvoltmeter der entsprechende Wert des Neigungsmessers abgelesen.

Die in den Abb. 15 dargestellten Verbesserungen, bezogen auf das lineare Modell von 4.1., führen zu der Standardabweichung für eine Einzelbeobachtung von $s_o = \pm 0,114''$. Die Genauigkeitsschätzung aus Differenzen zwischen Hin- und Rückmessungen, die unabhängig von einer Annahme über die Form der Kennlinie ist, ergibt die Standardabweichung $\bar{s}_o = \pm 0,066''$. Der Unterschied zwischen den Standardabweichungen (s. auch Tabelle 5) ist signifikant. Das lineare Modell reicht daher nicht zur Erfassung des systematischen Verhaltens des Neigungsmessers aus. Diese Aussage wird durch die Darstellung der Verbesserungen in 15d, 15e und 15f bestätigt. In dem dort betrachteten Bereich kann die Kennlinie durch ein Polynom 2. Grades gut erfaßt werden. Eine brauchbare Alternative ist auch hier die Zerlegung in zwei Teilbereiche, die jeweils getrennt durch eine Gerade repräsentiert werden können. Dieses Vorgehen wäre jedoch von fraglichem Nutzen, da die dazu notwendige Stabilität der Kennlinie nicht gewährleistet ist.

Für Neigungsmessungen mit dem untersuchten SCHAEVITZ-Neigungsmesser ist daher die Verwendung eines mittleren Angabewertes für den gesamten Meßbereich vorzuziehen. Der Anteil des Meßfehlers, der seine Ursache in der unvollständigen Erfassung der aktuellen Kennlinie hat, wird dann $\pm 0,1''$ betragen.

Zur Zeit werden Untersuchungen an drei weiteren SCHAEVITZ-Neigungsmessern durchgeführt, mit dem Ziel, eine repräsentative Aussage über das Meßsystem zu erarbeiten.

Sehr unterschiedlich fallen die Verbesserungen für die einzelnen Beobachtungsreihen mit der Elektrolytlibelle EWB von SCHMIDT aus, die in Abbildung 16 zusammengestellt sind. Während die Darstellungen 16a und 16c für die Komponente RL - RR eine nahezu lineare Kennlinie anzeigen, weist die Abbildung 16b im Bereich geringerer Neigungen große, in Hin- und Rückmessung reproduzierte, Verbesserungen aus. Die zweite Komponente LL - LR zeigt bei allen Meßreihen einen sehr unruhigen Verlauf der Kennlinie, die aber ebenfalls in Hin- und Rückmessung erstaunlich gut reproduziert wird.

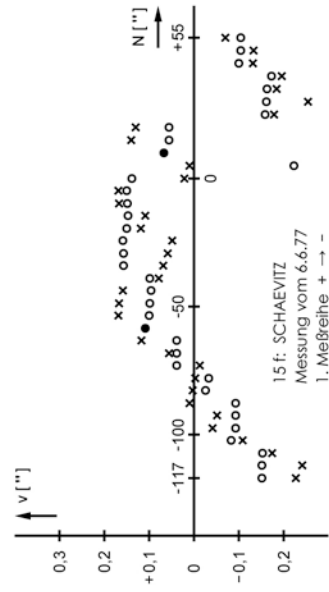
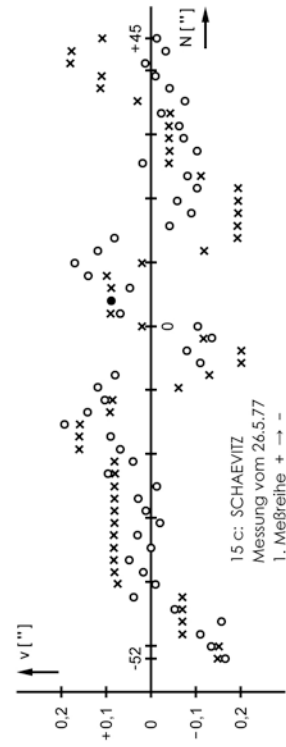
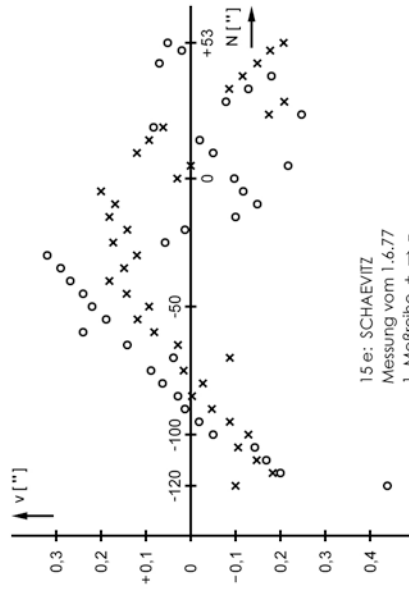
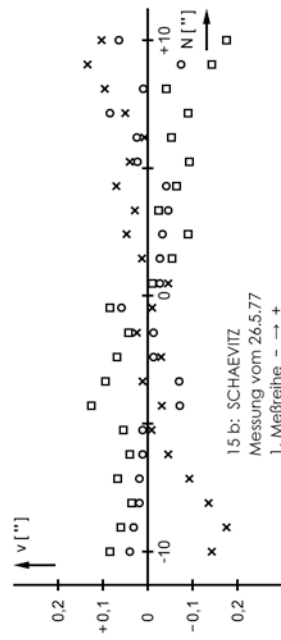
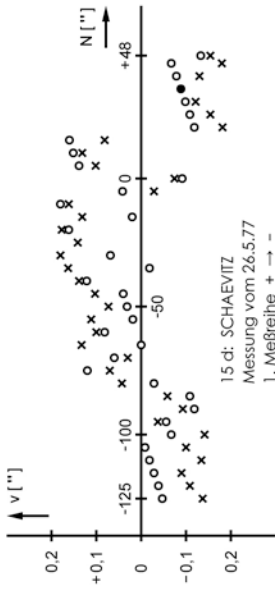
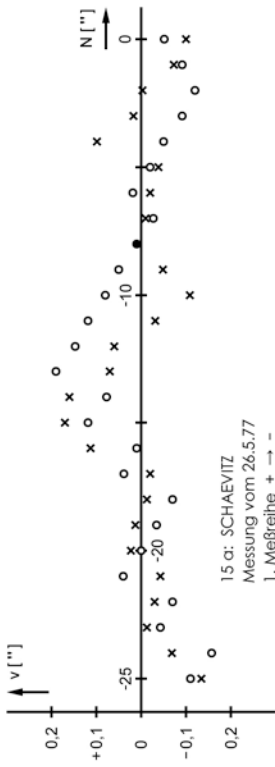


Abb. 15: Darstellung der Verbesserungen (v) nach der Ausgleichung mit linearem funktionalem Modell über der Neigung (N) für sechs Untersuchungen des Neigungsmessers vom Typ SCHAEVITZ. Es sind jeweils alle zwei oder drei zusammengehörenden Meßreihen in einem Guß ausgeglichen worden.

x 1. Meßreihe o 2. Meßreihe □ 3. Meßreihe ● mehrere Meßwerte fallen zusammen

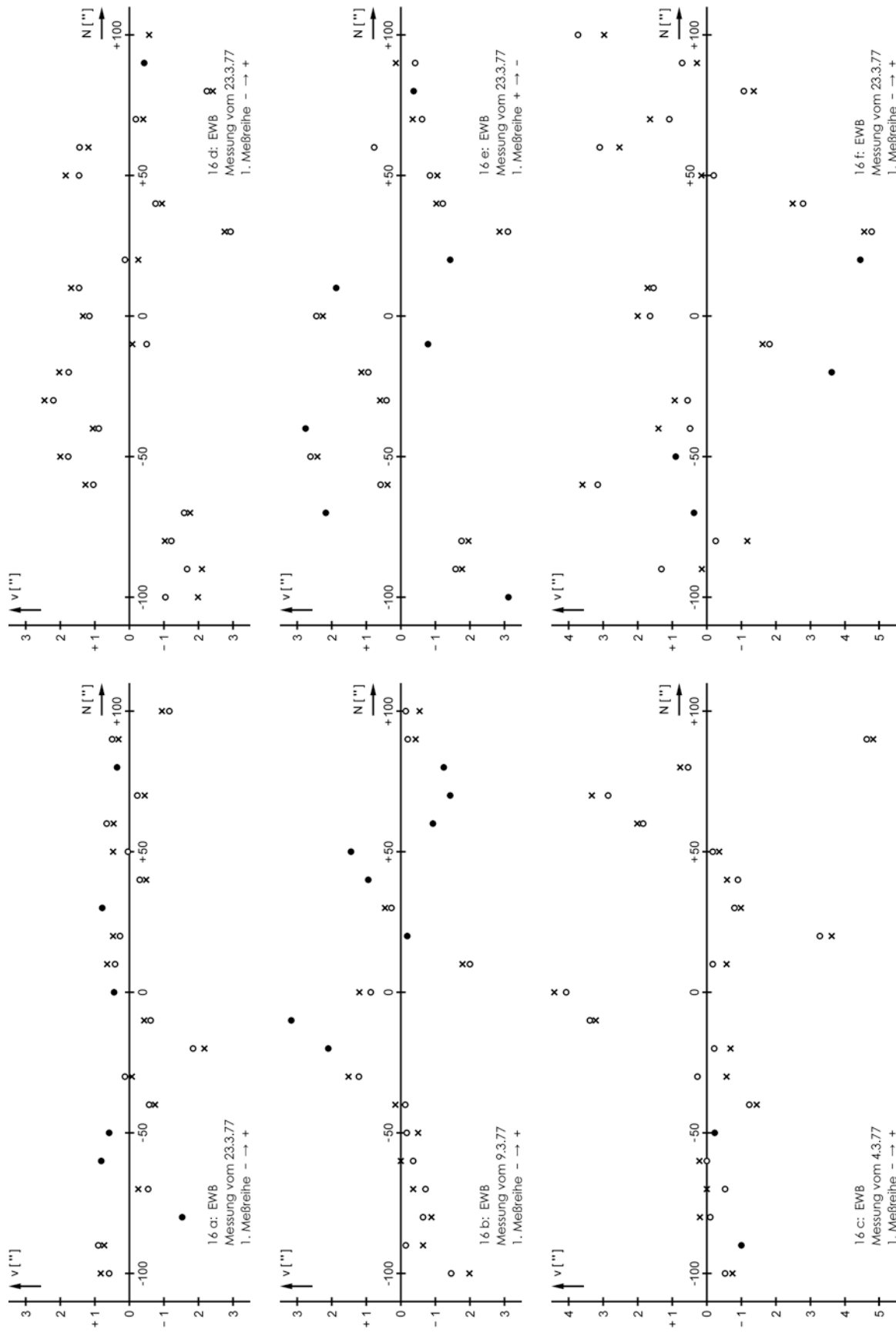


Abb. 16: Darstellung der Verbesserungen (v) nach der Ausgleichung mit linearem funktionalem Modell über der Neigung (N) für je drei Untersuchungen der Bereiche RL - RR und LL - LR des Neigungsmessers vom Typ SCHMIDT EWB. Die Hin- und Rückmessungen wurden jeweils in einem Guß ausgeglichen.

x 1. Meßreihe o 2. Meßreihe • beide Meßwerte fallen zusammen

Da der EWB-Neigungsmesser nach dem Prinzip der Dosenlibelle arbeitet, sind die extremen Unterschiede im Verlauf der Verbesserungen bei den einzelnen Reihen wahrscheinlich durch geringfügige Temperaturunterschiede, die die Blasengröße verändern, und durch geringe Querneigungen zu erklären, so daß als Ursache letztlich Unregelmäßigkeiten im Schliff der Lauffläche der Blase angenommen werden müssen.

Die ganze Problematik der Neigungsmessungen mit Flüssigkeitslibellen, die im Abschnitt 2 beschrieben wurde, kann auf die Elektrolytlibellen übertragen werden. Die sehr hohe Reproduzierbarkeit der Ablesungen bei konstanten Meßbedingungen, die zu den extrem kleinen Differenzen zwischen Hin- und Rückmessung führt, kann für praktische Neigungsmessungen nicht ausgenutzt werden.

Besonders deutlich wird dies an den in Tabelle 5 zusammengestellten Standardabweichungen s_0 und \bar{s}_0 , die sich bei diesem Neigungsmesser um den Faktor acht unterscheiden.

4.4. Der Umkehrfehler

Als Umkehrfehler bezeichnet man den Fehler, der auftritt, wenn die Meßrichtung geändert wird. Er ist bekannt aus Untersuchungen von Meßschrauben, Meßspindeln und insbesondere von Mikrometern. Bei diesen mechanisch-optischen Meßwerkzeugen wird dafür auch die Bezeichnung "toter Gang" benutzt.

Erste Untersuchungen dieses Fehlers an einer TALYVEL teilte SOLTAU in [27] mit. Er führte den Umkehrfehler auf elastische Verformungen des Pendels und des Anzeigegerätes zurück und verwendete deshalb für diesen Fehler die Bezeichnung Hysterese. Er vermutete, daß der Fehler von der Auslenkzeit, der Auslenkrichtung und dem Auslenkbetrag abhängig sein müßte. Zu seiner Erfassung wurde die TALYVEL um 40" ausgelenkt und nach drei Minuten zurückgestellt. Als Ergebnis ergab sich die Differenz der Nullablesung zu $d = 0,08'' \pm 0,03''$.

Im Rahmen der eigenen Untersuchungen haben die Verfasser keine speziellen Messungen zur Bestimmung des Umkehrfehlers durchgeführt. Im mathematischen Modell zur Auswertung der Beobachtungen erwies es sich aber als notwendig, für jede Teilreihe eine eigene Konstante, vergleichbar mit der Orientierungsunbekannten bei Richtungsmessungen, einzuführen. Der Ansatz wurde so gewählt, daß man die Differenz der Orientierungsunbekannten aus Hin- und Rückmessung als Ausgleichungsparameter unmittelbar erhielt. Diese Unbekannte fängt neben dem Umkehrfehler des Neigungsgebers noch weitere Effekte auf. Das für die Ausgleichung benutzte lineare Modell erfaßt zwar die wesentlichen Einflüsse, führt aber dazu, daß z.B. bei nicht-linearem Driften des Nullpunktes Teile dieses Modellfehlers wie eine Änderung der Additionsunbekannten wirken können. Außerdem muß damit gerechnet werden, daß auch der Libellenprüfer einen Umkehrfehler aufweist, der mit seinem vollen Betrag eingeht und sich nur durch den Vergleich der Ergebnisse von mehreren Neigungsmessern aufdecken läßt.

Unter diesen und ähnlichen Vorbehalten sind die Ergebnisse, die in Tabelle 6 zusammengestellt sind, zu interpretieren. Es wurde dabei getrennt zwischen dem Umkehrfehler d_+ , der auftritt, wenn der Umkehrpunkt am rechten Rand der Ableseskala liegt, und d_- für den linken Rand. Die Dauer der Meßreihen und die Temperatur sind jeweils mit angegeben. Bei den Meßreihen wurde immer der gesamte Meßbereich ausgenutzt. Die Neigungserteilung erfolgte stets in Richtung des Zeigerausschlages. Alle Messungen wurden mit dem Freiburger Präzisionslibellenprüfer durchgeführt, der auf einem Meßpfeiler des Instituts für Astro-

| Libelle | Datum | Temperatur [°C] | Dauer [Min.] | Umkehrfehler d ₊ d ₋ | Standardabweichung ["] | Anzahl Beobachtungen |
|--|----------|-----------------|--------------|---|--------------------------|----------------------|
| TALYVEL A x) | 09-03-77 | 16,5 | 55 | + 0,136 | ± 0,031 | 102 |
| | | | 45 | - 0,188 | 0,031 | 102 |
| | 09-03-77 | 26,6 | 60 | + 0,159 | 0,043 | 102 |
| | | | 60 | - 0,196 | 0,043 | 102 |
| | 29-03-77 | 23,0 | 15 | + 0,192 | 0,068 | 19 |
| | | | 15 | - 0,168 | 0,068 | 19 |
| | 30-03-77 | 5,8 | 15 | + 0,165 | 0,103 | 19 |
| | | | 17 | - 0,223 | 0,103 | 19 |
| 31-03-77 | 22,7 | 45 | + 0,262 | 0,056 | 49 | |
| | | 45 | - 0,231 | 0,056 | 49 | |
| TALYVEL B x) | 14-04-77 | 20,6 | 35 | + 0,142 | 0,056 | 102 |
| | | | 35 | - 0,196 | 0,056 | 102 |
| TALYVEL C x) | 14-04-77 | 20,3 | 60 | + 0,165 | 0,043 | 102 |
| | | | 35 | - 0,148 | 0,043 | 102 |
| TALYVEL D x) | 15-04-77 | 20,4 | 40 | + 0,114 | 0,025 | 102 |
| | | | 35 | - 0,141 | 0,025 | 102 |
| NIVELTRONIC | 09-03-77 | 17,0 | 35 | - 0,020 | 0,039 | 62 |
| | | | 25 | - 0,113 | 0,039 | 62 |
| | 09-03-77 | 25,8 | 35 | - 0,052 | 0,022 | 62 |
| | | | 30 | - 0,045 | 0,022 | 62 |
| | 18-03-77 | 22,6 | 35 | + 0,008 | 0,022 | 62 |
| | | | 30 | - 0,067 | 0,022 | 62 |
| 30-03-77 | 5,5 | 10 | + 0,078 | 0,056 | 14 | |
| | | 10 | - 0,057 | 0,056 | 14 | |
| SCHAEVITZ | 26-05-77 | 18,3 | 95 | - 0,063 | 0,039 | 70 |
| | | | 40 | + 0,031 | 0,046 | 52 |
| | 01-06-77 | 18,4 | 130 | - 0,086 | 0,104 | 92 |
| | 02-06-77 | 18,6 | 120 | + 0,116 | 0,061 | 76 |
| x) Bei den Messungen mit den Neigungsgebern A, B, C, D wurde das gleiche Anzeigergerät benutzt | | | | | | |

Tabelle 6: Umkehrfehler bei Meßreihen auf dem Freiburger Libellenprüfer mit verschiedenen elektronischen Neigungsmessern.

nomische und Physikalische Geodäsie der TU München aufgebaut war.

Bei Durchsicht der Tabelle zeigt sich, daß die Neigungsgeber NIVELTRONIC und SCHAEVITZ keinen signifikanten Umkehrfehler aufweisen. Außerdem scheint der Libellenprüfer in dieser Hinsicht nur mit einem unbedeutenden Fehler behaftet zu sein.

Eindeutig vorhanden ist der Umkehrfehler bei der TALYVEL A. Die Werte von d_+ und d_- stimmen sehr gut überein. Da sich auch bei den Geräten TALYVEL B, C und D dieselben Werte ergeben, ist entweder zu schließen, daß diese Werte für die TALYVEL-Neigungsgeber repräsentativ sind, oder aber, daß die Fehlerquelle im Anzeigergerät liegt. Weitere Untersuchungen sollen diese Frage noch klären. Die Größe des Wertes läßt es bei hohen Genauigkeitsforderungen erforderlich erscheinen, den Umkehrfehler in Betracht zu ziehen und gegebenenfalls durch geeignete Meßanordnungen zu eliminieren. Temperatur und Meßdauer haben offensichtlich keinen Einfluß auf die Größe des Umkehrfehlers.

Bei den Meßreihen mit der "Elektronischen Wasserwaage" EWB war die Standardabweichung des Umkehrfehlers stets größer als der Fehler selbst, so daß es als sinnlos erachtet wurde, diese Werte in der Tabelle mit aufzunehmen.

4.5. Nullpunktskonstanz

Bei Absolutmessungen und Langzeitbeobachtungen ist die Konstanz des Nullpunktes des Neigungsmessers besonders wichtig. Erfahrungsgemäß treten bei Meßinstrumenten, die elektronische Bauteile enthalten, mehrere Effekte auf. Unmittelbar nach dem Einschalten werden die Bauteile aufgeheizt. Erst nach einer gewissen Zeit, die je nach Umgebungstemperatur bis zu zwei Stunden dauern kann, wird eine stabile Betriebstemperatur erreicht. In dieser Aufheizzeit ist mit einer Verlagerung (Drift) des Nullpunktes zu rechnen. Ähnliches Verhalten ist z.B. bei elektronischen Entfernungsmessern als Einlaufeffekt zu beobachten.

Da die Betriebstemperatur eine Funktion der Umgebungstemperatur ist, muß bei langdauerndem Einsatz mit einer Drift des Nullpunktes gerechnet werden, wenn die Temperatur nicht konstant gehalten werden kann.

Bei konstanter Betriebstemperatur kann man außerdem ein Langzeitdriften in allerdings meist geringeren Grenzen beobachten. Diese Nullpunktverlagerung ist oft nur schwer nachzuweisen, da eine Vielzahl anderer Einflüsse vorhanden sein können, die eine allmähliche oder periodische Veränderung der gesamten Versuchsanordnung bewirken und sich nicht getrennt erfassen lassen.

Die dritte Art der Drift des Nullpunktes wirkt noch langfristiger und macht sich insbesondere bei fest eingebauten Gebern bemerkbar. Als Ursache kann das allmähliche Altern der Bauteile, das mit einer Änderung der Eigenschaften einhergeht, betrachtet werden.

Der Einfluß von Nullpunktsänderungen kann durch Beobachtung in "zwei Lagen" weitgehend ausgeschaltet werden. Bei stationären Meßeinrichtungen ist dies jedoch nicht möglich, dort muß eine regelmäßige Nach-eichung gefordert werden.

Im folgenden wird zunächst über Untersuchungen zum Einlaufverhalten berichtet und danach werden Ergebnisse von mehrtägigen Messungen mitgeteilt.

GLISSMANN und WENZEL [10] fanden für einen Neigungsmesser vom Typ TALYVEL 2, dessen Anzeige durch den Einbau zusätzlicher elektronischer Bauelemente digitalisiert worden war, bei Labormessungen zur Driftuntersuchung, daß der Gesamtbetrag der Drift, auch über mehrere Stunden, unter 0,2" blieb, und daß die Größenordnung der Drift und die Form der Driftkurve vom Meßbereich unabhängig sind.

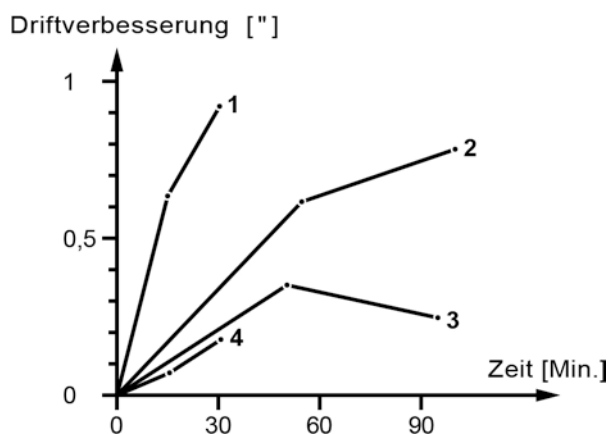
Eine Aussage über das Driften der Neigungsanzeige ist auch möglich, wenn im mathematischen Modell zur Bestimmung der Kennlinie des Neigungsmessers ein in der Zweit lineares Glied mitgeführt wird. Die auf diesem Weg ermittelten Driftkonstanten werden zunächst mitgeteilt.

Bei der Untersuchung des Feinbereichs von vier TALYVEL-Neigungsgebern wurde das gleiche Anzeigergerät benutzt (Tab. 7). Die Meßbedingungen wurden konstant gehalten. Jede Meßreihe bestand aus vier Einzelreihen nach Abb. 9.

| TALYVEL | Meßdauer [Min.] | Anzahl der Ablesungen | Drift [" / h] | Standardabweichung |
|---------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------------|
| A | 90 | 204 | + 0,54 | ± 0,12" |
| B | 95 | 204 | - 0,04 | ± 0,09" |
| C | 70 | 204 | - 0,06 | ± 0,15" |
| D | 75 | 204 | + 0,09 | ± 0,06" |

Tabelle 7: Driftkonstanten zur Korrektur der Ablesung für vier TALYVEL-Neigungsgeber

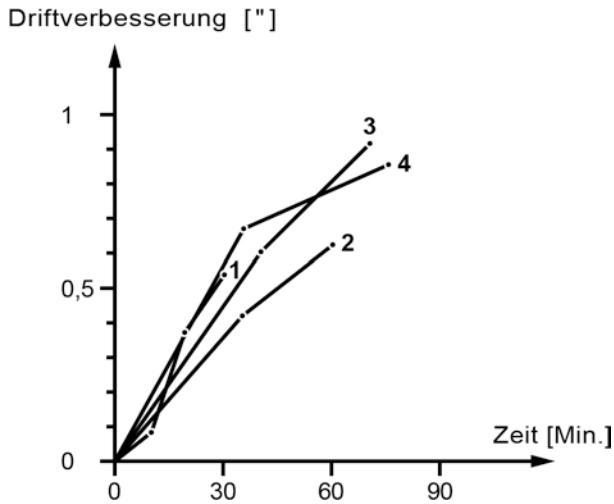
Dem unterschiedlichen Verhalten verschiedener Geber unter gleichen Meßbedingungen steht das unterschiedliche Verhalten des gleichen Meßsystems bei geänderten Meßbedingungen gegenüber. Hierüber vermittelt Abb. 17 einen Eindruck.



| Meßreihe | Anzahl Abl. | Temp. [°C] | Datum |
|----------|-------------|--------------|----------|
| 1 | 44 | 5,8 | 30-03-77 |
| 2 | 204 | 16,5 | 09-03-77 |
| 3 | 204 | 22,9 | 16-03-77 |
| 4 | 44 | 23,0 | 29-03-77 |

Abb. 17: Driftkorrektur der TALYVEL A bei verschiedenen Temperaturen.

Die entsprechenden Ergebnisse für die anderen Neigungsgebertypen sind in den folgenden Abbildungen zusammengestellt.

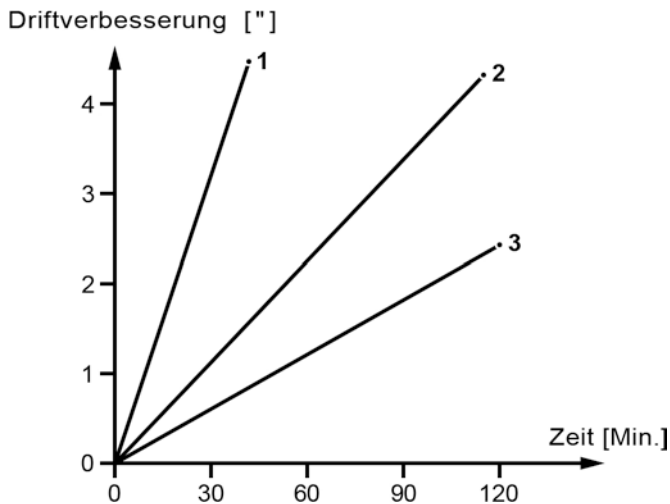


| Meßreihe | Anzahl Abl. | Temp. [°C] | Datum |
|----------|-------------|--------------|----------|
| 1 | 52 | 5,5 | 30-03-77 |
| 2 | 124 | 17,0 | 09-03-77 |
| 3 | 124 | 21,5 | 04-03-77 |
| 4 | 124 | 25,9 | 11-03-77 |

Abb. 18: Driftkorrektur des NIVELTRONIC bei verschiedenen Temperaturen.

Das untersuchte NIVELTRONIC zeigt ein sehr stabiles Verhalten. Die Drift ist bei diesem Gerät offenbar von der Umgebungstemperatur unabhängig.

Mit der SCHAEVITZ konnten bisher noch keine Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden. Die Driftkonstanten aus drei Messungen bei gleicher Temperatur sind in Abb. 19 dargestellt.

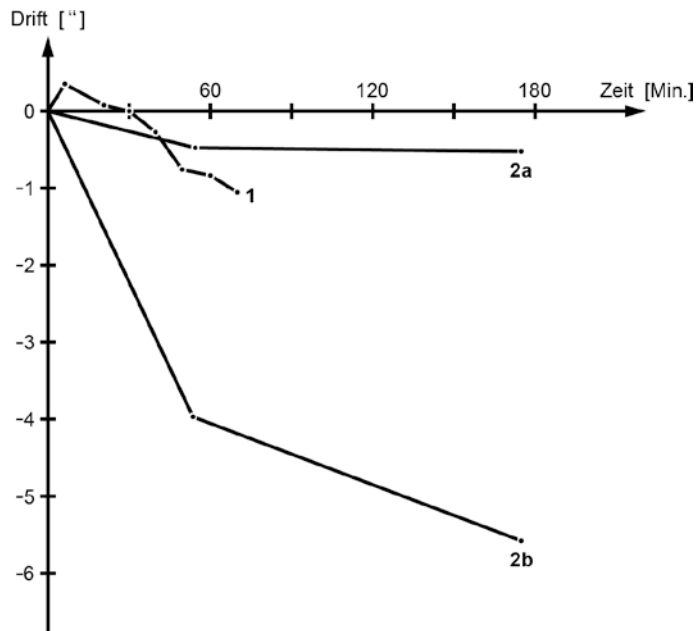


| Meßreihe | Anzahl Abl. | Temp. [°C] | Datum |
|----------|-------------|--------------|----------|
| 1 | 52 | 18,4 | 26-05-77 |
| 2 | 88 | 18,4 | 01-06-77 |
| 3 | 72 | 18,6 | 02-06-77 |

Abb. 19: Driftkorrektur der SCHAEVITZ.

Bei den bisher mitgeteilten Ergebnissen handelt es sich jeweils um die Korrektur der Neigungsablesung wegen Drift, die im mathematischen Modell zur Bestimmung der mittleren Angabe mitbestimmt wurde.

Weist die Meßanordnung neben der Nullpunktdrift weitere langperiodische oder zeitlineare Veränderungen auf, wie z.B. elastische Nachwirkungen des Pendels, so werden diese Effekte durch die Driftkonstante mit-erfaßt. Zur Klärung dieser Frage wurden die in Abbildung 20 dargestellten Untersuchungen durchgeführt, bei denen der Neigungsgeber jeweils auf einer festen Unterlage stand und keine Neigungsänderungen erteilt, sondern nur abgelesen wurde.



| Meßreihe | Instrument | Temp. [°C] | Datum |
|----------|------------|--------------|----------|
| 1 | TALYVEL | 25,0 | 13-09-77 |
| 2a x) | TALYVEL | 18,6 | 15-06-77 |
| 2b x) | SCHAEVITZ | 18,6 | 15-06-77 |

x) 2a und 2b wurden gleichzeitig auf demselben Pfeiler beobachtet.

Abb. 20: Änderung der Ablesung bei fester Aufstellung des Neigungsgebers.

Die Untersuchungen zeigen kein einheitliches Bild, lassen aber erkennen, daß bei allen untersuchten Neigungsmessern der Nullpunkt in der Aufheizzeit driftet. Besonders stark tritt dies bei der SCHAEVITZ in Erscheinung. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, daß zu dieser Libelle keine optimal angepaßte Anzeige zur Verfügung stand, sondern mit einem provisorisch angeschlossenen Digitalvoltmeter gearbeitet wurde. Aber auch bei TALYVEL und NIVELTRONIC erreicht der Betrag der Änderung des Nullpunktes in der Einlaufzeit den Wert von einer Winkelsekunde.

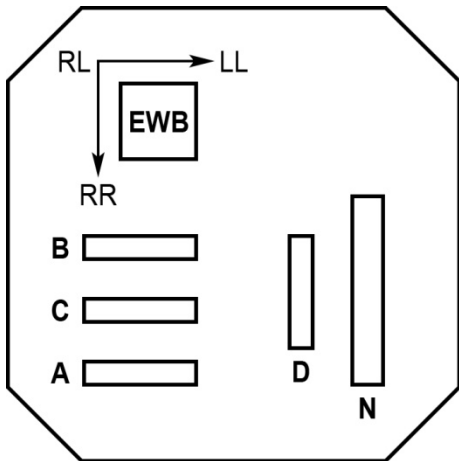
Für den EWB-Neigungsmesser wurden entsprechende Driftuntersuchungen durchgeführt. Wegen der um den Faktor zehn geringeren Empfindlichkeit ergaben sich hier jedoch keine signifikanten Ergebnisse.

Zur Beurteilung der mittelfristigen Nullpunkt Konstanz wurden mehrstündige und mehrtägige Dauerbeobachtungen durchgeführt (s. auch SOLTAU [27]). Die Ergebnisse sind in den folgenden Darstellungen zusammengefaßt.

Abb. 22 zeigt die Ergebnisse einer Reihe von 10 Tagen Dauer. Hier wurden vier Neigungsmesser vom Typ TALYVEL, ein NIVELTRONIC, beide Komponenten der SCHMIDT-EWB und vom dritten Tag an noch zusätzlich eine konventionelle Röhrenlibelle mit der Angabe von $p = 1,05''$ beobachtet. Die Neigungsmesser waren gemäß Abb. 21 auf dem gut gegründeten Beobachtungspfeiler des Instituts für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München angeordnet. Die Ablesungen wurden nach der Einlaufzeit begonnen. Die Temperatur lag meist zwischen 20° und 21° , mit wenigen Abweichungen nach oben und unten.

Die Beobachtungen an den ersten drei Tagen, die in dichter Folge als später gemacht wurden, sind in Abb. 23 noch einmal in einem anderen Abszissenmaßstab dargestellt.

Die Abbildungen zeigen ein sehr gleichmäßiges Verhalten der Neigungsgeber. Die Bewegungen des Versuchsaufbaus sind offensichtlich erheblich größer als die Nullpunktsdrift der Neigungsmesser. Auf die Drift kann nur aus der Differenz zwischen den gleichorientierten Gebern geschlossen werden. Diese übersteigt



A, B, C, D: Neigungsmesser vom Typ TALYVEL, $p \approx 1''$

EWB: "Elektronische Wasserwaage", $p \approx 10''$

N: NIVELTRONIC, $p \approx 2''$

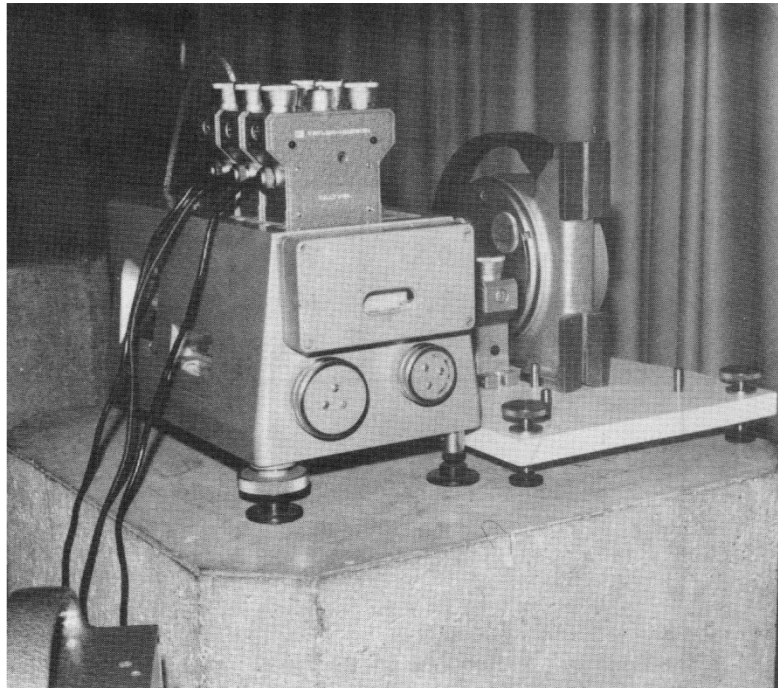


Abb. 21: Anordnung der Neigungsmesser auf dem Beobachtungspfeiler bei der Untersuchung zur Langzeitdrift.

bei den Präzisionsgebern nicht den Betrag von $0,5''$ in 10 Tagen. Überraschend gut ist auch das Verhalten der EWB, die trotz ihrer geringen Empfindlichkeit dieselbe Tendenz erkennen läßt wie die anderen Neigungsmesser.

Die gleichmäßige Änderung der Neigungsanzeige gleichorientierter Geber deutet auf Änderungen der Versuchsanordnung hin, die eventuell in geringen Bewegungen des Beobachtungspfeilers ihre Ursache haben. Die Ablesungen an der Röhrenlibelle stören etwas den Gesamteindruck. Dies findet aber seine Erklärung darin, daß die Röhrenlibelle wegen Platzmangels auf dem Nachbarpfeiler aufgestellt werden mußte.

Die Abb. 24 zeigt das Verhalten des Neigungsmessers von SCHAEVITZ, der auf einem Pfeiler gemeinsam mit der TALYVEL A als Kontrollinstrument beobachtet wurde. Die Ablesungen wurden auf einem Trommelschreiber registriert. Insbesondere fällt bei diesem Gerät die extrem lange Einlaufzeit auf.

4.6. Einfluß der Temperatur

In diesem Abschnitt soll der Einfluß der Umgebungstemperatur auf die elektronischen Neigungsmesser betrachtet werden. Bei allen Versuchen wurden die Messungen erst nach einer ausreichenden Anpassungszeit begonnen, so daß für den Verlauf einer Beobachtungsreihe mit einer festen Temperatur gerechnet werden darf. Als beeinflusste Größen werden die mittlere Angabe und die Standardabweichung, die aus den Restfehlern des linearen Auswertemodells geschätzt wird, betrachtet. Änderungen der Lage des Nullpunktes können bei diesen Untersuchungen nicht erfaßt werden. Hiermit haben sich HALLERMANN und KALISCHEWSKI [14] in speziellen Versuchsanordnungen für zwei TALYVEL-Neigungsmesser beschäftigt. Sie fanden bei ihren Messungen die Firmenangaben des TALYVEL-Handbuches nur für einen der Neigungsmesser näherungsweise bestätigt. Bei dem zweiten war die Driftrate im untersuchten Temperaturbereich von $+ 20^{\circ}\text{C}$ bis $+ 60^{\circ}\text{C}$ sowohl für den Geber als auch für die Anzeigeeinheit etwa um den Faktor zwei bis drei größer als die

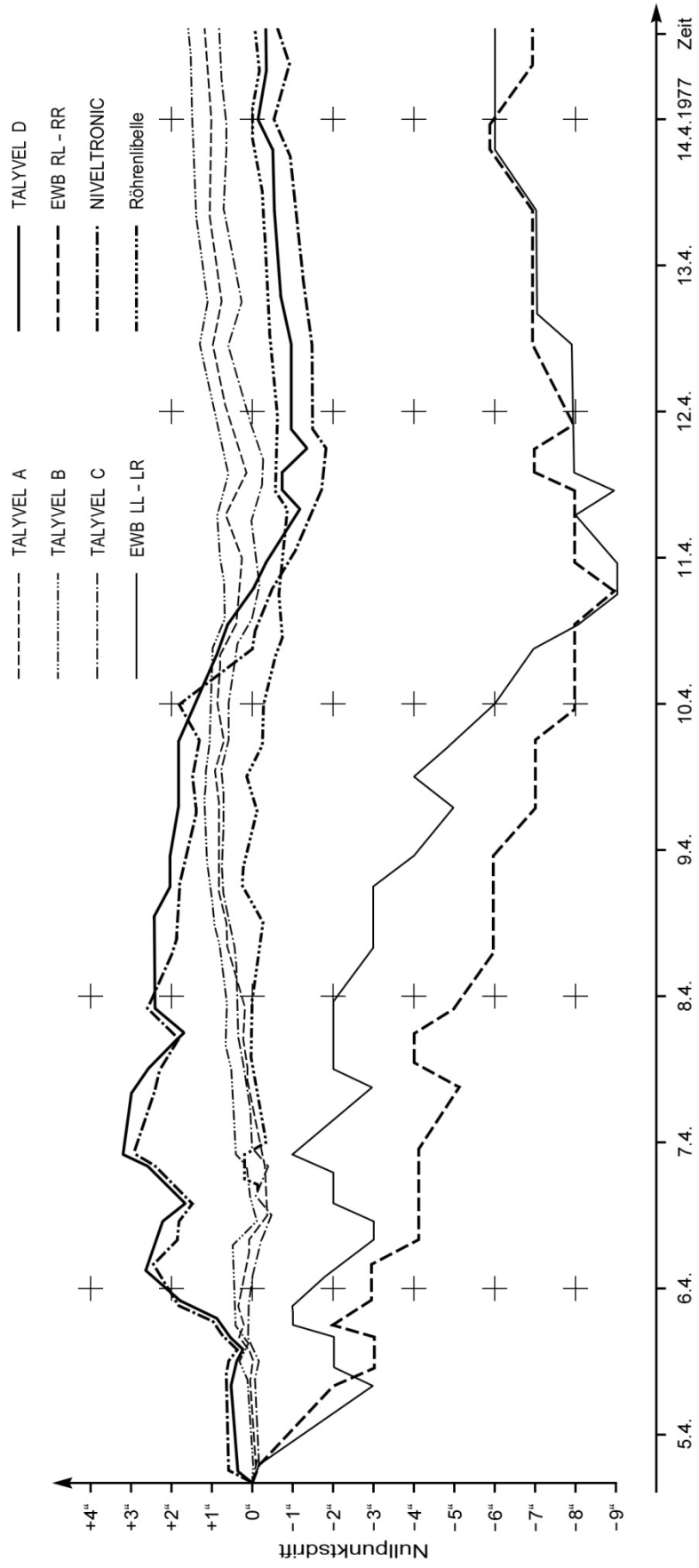


Abb. 22: Änderung der Ablesung an fünf elektronischen Neigungsmessern und einer Röhrenlibelle innerhalb von 10 Tagen.

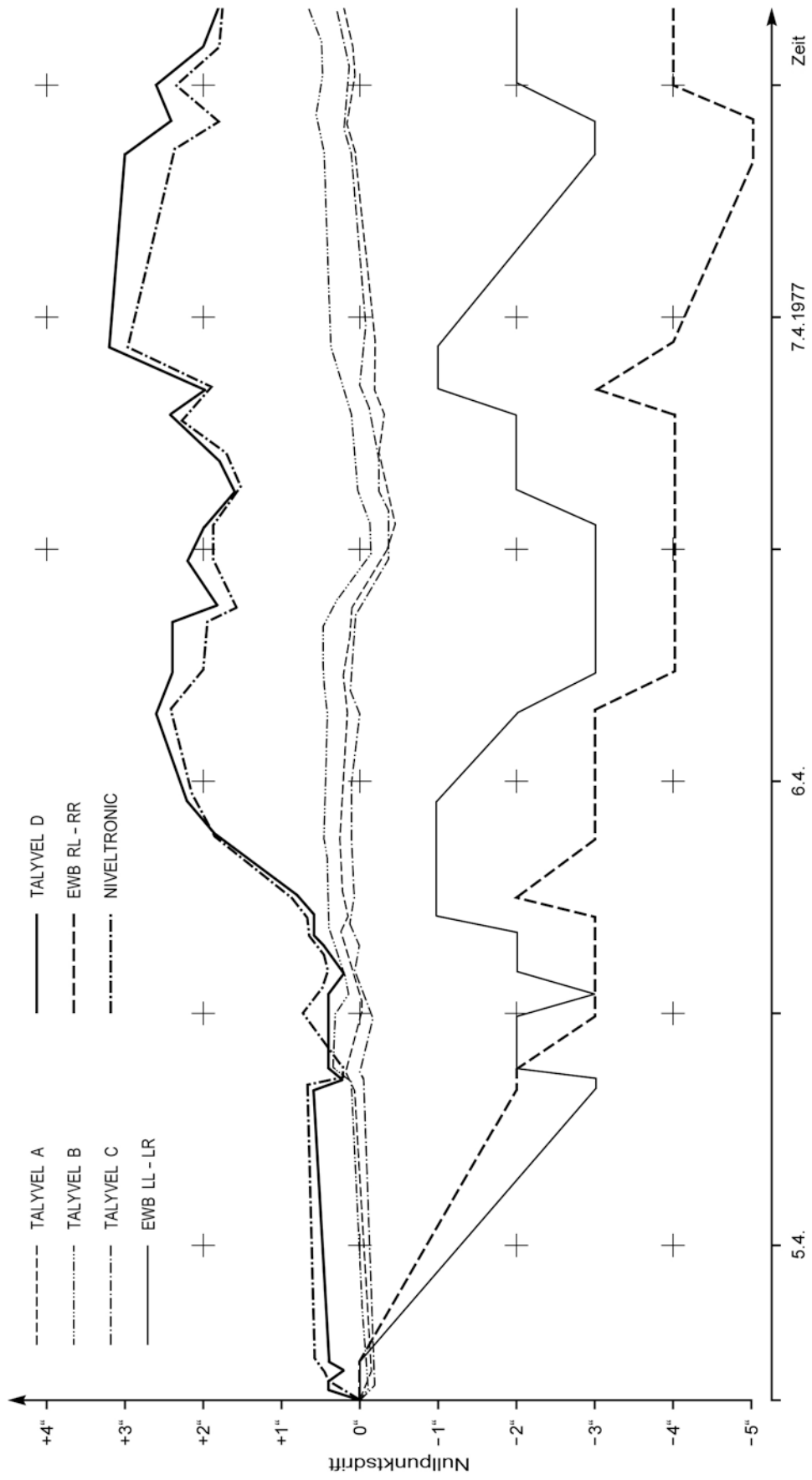


Abb. 23: Änderung der Ablesung an fünf elektronischen Neigungsmessern innerhalb von drei Tagen.

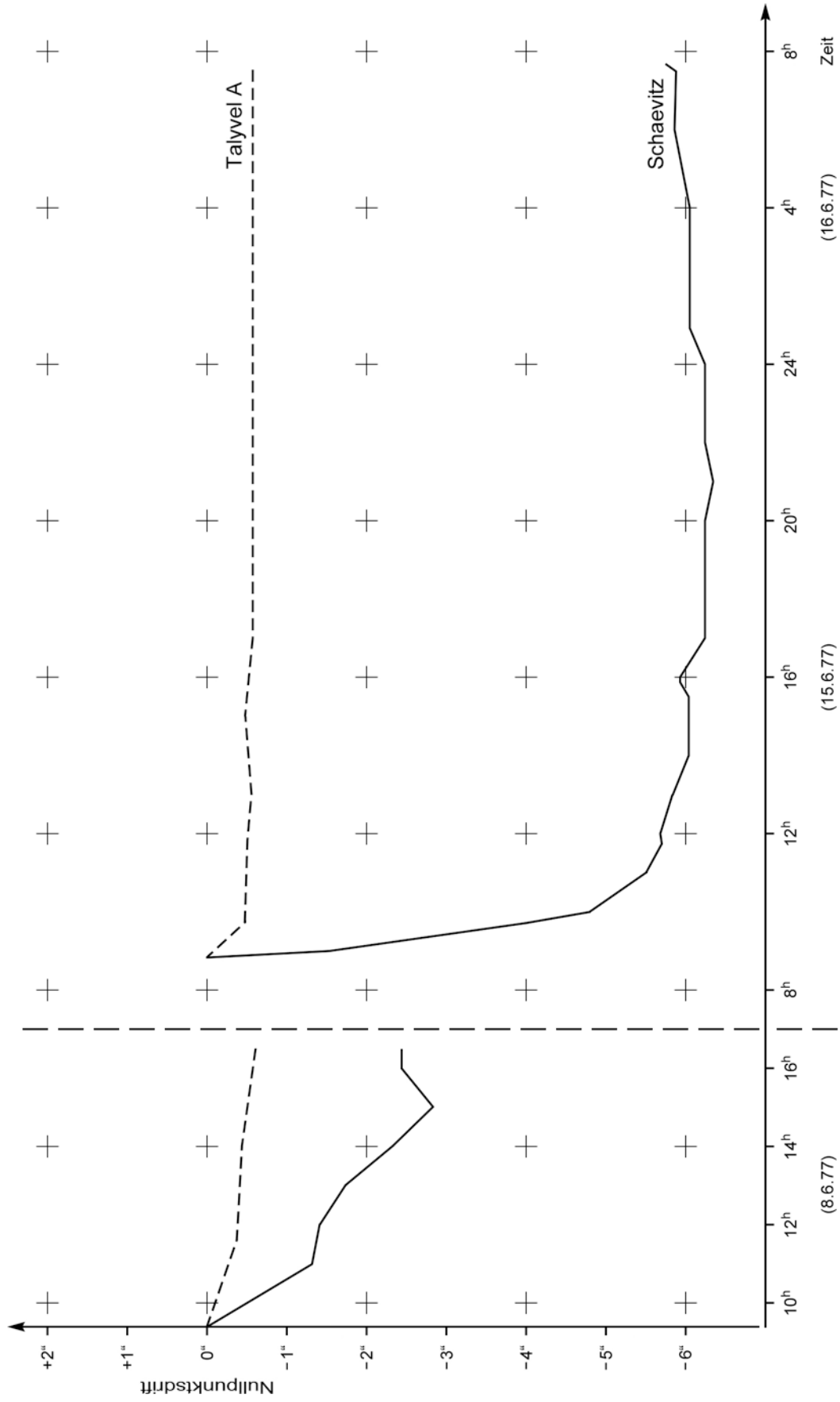


Abb. 24: Darstellung von zwei Versuchen zur Ermittlung der Nullpunktsdrift des Neigungsmessers von SCHAEVITZ.

Firmenangaben.

MONTAG berichtete in [19] über die Ergebnisse von Temperaturversuchen an einer TALYVEL in einer Tieftemperaturkammer. Er fand für das untersuchte Gerät eine deutliche Abhängigkeit der mittleren Angabe von der Temperatur. Die mittlere Angabe des 50"-Meßbereichs änderte sich um $-0,07''/\text{grd}$ im Temperaturbereich von -22°C bis $+8^{\circ}\text{C}$. Ein Einfluß der Temperatur auf die Meßgenauigkeit war nicht feststellbar.

MILOVANOVIC [16] führte ähnliche Untersuchungen im Temperaturbereich von -20°C bis $+50^{\circ}\text{C}$ durch. Er ließ die Temperatur jedoch nur auf den Neigungsgeber wirken, während das Anzeigergerät stets Zimmertemperatur behielt. Unter diesen Bedingungen unterschieden sich die Werte der mittleren Angabe nur bis zu einem Hundertstel einer Sekunde. Diesen Widerspruch zu den Ergebnissen von MONTAG führte er im wesentlichen auf die Temperaturempfindlichkeit der Batterien zurück.

Die Messungen der Verfasser zur Untersuchung des Temperatureinflusses beschränken sich auf den Bereich von 0°C bis 27°C . Die zulässigen Temperaturbereiche können der Tabelle 4 entnommen werden. Eine teilweise Zusammenfassung der Ergebnisse wird in Tabelle 8 gegeben. Die Abbildungen 25, 26 und 27 zeigen die Einzelergebnisse.

Ein Teil der Untersuchungen wurde in einer Klimakammer durchgeführt, die keine befriedigende Aufstellmöglichkeit für den Libellenprüfer bietet. Dies hatte zur Folge, daß die Standardabweichung etwa den doppelten Betrag des Wertes annimmt, der bei Messungen auf einem Pfeiler erreicht wurde. Außerdem ist ein Genauigkeitsunterschied zwischen den Untersuchungen mit dem Freiburger Libellenprüfer und dem Legebrett zu verzeichnen. Bei der Beurteilung der Werte für die TALYVEL in der Tabelle 8 ist außerdem zu berücksichtigen, daß einige Male durch eine Justierung versucht wurde, für die mittlere Angabe genau den Wert $1''$ einzustellen. Es darf daher nur die Änderung der Angabe für denselben Justierzustand betrachtet werden. In Abb. 25 ist dies durch Reduktion auf einen gemeinsamen Justierzustand berücksichtigt.

Die Standardabweichung der Angabe stellt für zusammengefaßte Ergebnisse die äußere Genauigkeit dar, die aus den Mittelwerten der Einzelreihen geschätzt wurde. Die Standardabweichung s_0 ist stets der Schätzwert für den Fehler einer einzelnen Beobachtung innerhalb einer Meßreihe.

Die mittlere Angabe der TALYVEL zeigt keine eindeutige Reaktion auf die Änderung der Temperatur, obwohl stets Geber und Anzeigeelement der Temperaturänderung ausgesetzt wurden. Bei den Meßreihen im August 1976 scheint die Angabe mit zunehmender Temperatur größer zu werden, während die Messungen vom 29. bis 31.3.77 die entgegengesetzte Tendenz andeuten. Es läßt sich bei keiner der Meßgruppen durch eine Varianzanalyse bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ein Temperatureinfluß auf die Angabe nachweisen.

Dieselbe Aussage gilt für die Standardabweichung s_0 , die neben den Beobachtungsfehlern die Modellanpassungsfehler enthält. Auch hier scheint die Temperatur im erfaßten Bereich ohne Einfluß zu sein.

Versuche auch bei Minustemperaturen Meßreihe durchzuführen, verliefen unbefriedigend und wurden abgebrochen, da mit den verfügbaren Batterien die Stromversorgung nicht in ausreichendem Maß gewährleistet werden konnte.

Das NIVELTRONIC zeigt bei den Versuchen eindeutig eine Abnahme der mittleren Angaben bei zunehmen-

| Neigungsmesser | Datum | Temperatur [°C] | mittl. Angabe p ["] | s _o ["] | Anzahl der Beobachtungen | Anzahl der Meßreihen | |
|----------------|-------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|---|
| TALYVEL A | 18-08-76 | 12,5 | 0,982 ± 0,007 | ± 0,14 | 99 | 4 | |
| | 5/9-08-76 | 24,0 - 25,0 | 1,012 ± 0,004 | 0,20 | 300 | 12 | |
| | 11-08-76 | 27,0 | 1,004 ± 0,002 | 0,16 | 66 | 4 | |
| | 09-03-77 | 16,5 | 0,992 ± 0,001 | 0,10 | 198 | 5 | |
| | 3/11-03-77 | 21,7 - 22,6 | 0,996 ± 0,002 | 0,14 | 631 | | |
| | 09-03-77 | 26,6 | 0,998 ± 0,001 | 0,14 | 120 | | |
| | 30-03-77 | 0,9 | 1,000 ± 0,003 | 0,20 | 20 | | |
| | 30-03-77 | 5,8 | 1,002 ± 0,001 | 0,15 | 38 | | |
| | 30-03-77 | 11,0 | 1,000 ± 0,002 | 0,18 | 38 | | |
| | 30-03-77 | 16,1 | 0,998 ± 0,002 | 0,18 | 38 | | |
| | 30-03-77 | 20,7 | 0,998 ± 0,001 | 0,18 | 90 | | |
| | 29-03-77 | 23,0 | 0,995 ± 0,001 | 0,10 | 38 | | |
| | NIVELTRONIC | 30-03-77 | 0,4 | 2,056 ± 0,002 | 0,11 | 34 | 5 |
| 30-03-77 | | 5,5 | 2,063 ± 0,001 | 0,07 | 34 | | |
| 30-03-77 | | 9,5 | 2,063 ± 0,001 | 0,06 | 34 | | |
| 9/30-03-77 | | 15,9 - 17,2 | 2,040 ± 0,004 | 0,08 | 148 | | |
| 3/18-03-77 | | 21,2 - 22,6 | 2,011 ± 0,003 | 0,07 | 565 | 7 | |
| 09-03-77 | | 26,1 | 2,006 ± 0,001 | 0,06 | 118 | | |
| EWB RL - RR | 19-08-77 | 12,5 | 9,89 ± 0,03 | 1,21 | 36 | 2 | |
| | 4/23-03-77 | 22,7 | 10,67 ± 0,05 | 1,61 | 74 | | |
| | 07-08-76 | 25,0 | 11,07 ± 0,05 | 2,09 | 77 | | 4 |
| | 07-08-76 | 45,0 | 12,26 ± 0,10 | 3,26 | 38 | | |
| EWB LL - LR | 18-08-76 | 12,5 | 9,10 ± 0,09 | 3,93 | 34 | 3 | |
| | 23-03-77 | 22,2 | 10,31 ± 0,02 | 2,01 | 110 | | |
| | 5/9-08-76 | 24,0 - 25,0 | 10,34 ± 0,10 | 2,78 | 91 | | 5 |
| | 09-08-76 | 45,0 | 11,67 ± 0,10 | 3,25 | 38 | | |

Tabelle 8: Mittlere Angabe p und Schätzung der Standardabweichung s_o aus den Residuen des linearen Modells.

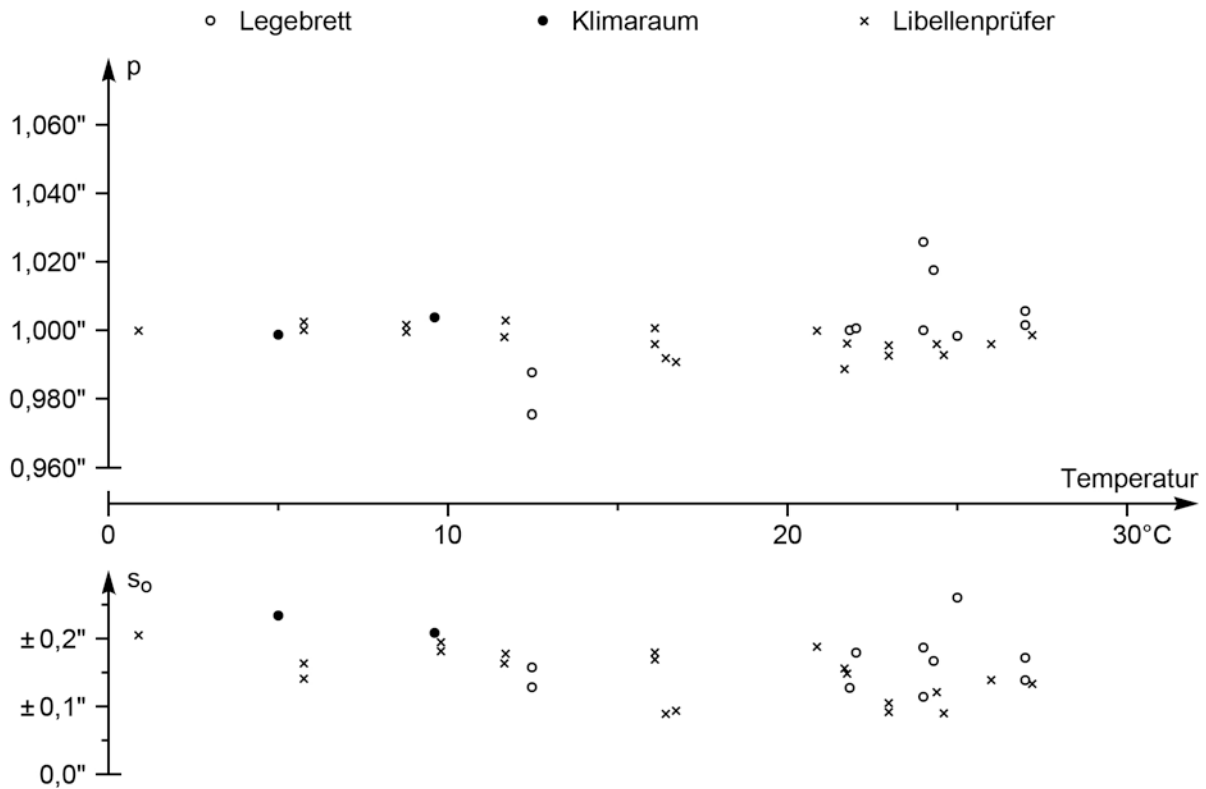


Abb. 25: Darstellung der mittleren Angabe p und der Standardabweichung s_0 über der Temperatur für die TALYVEL A.

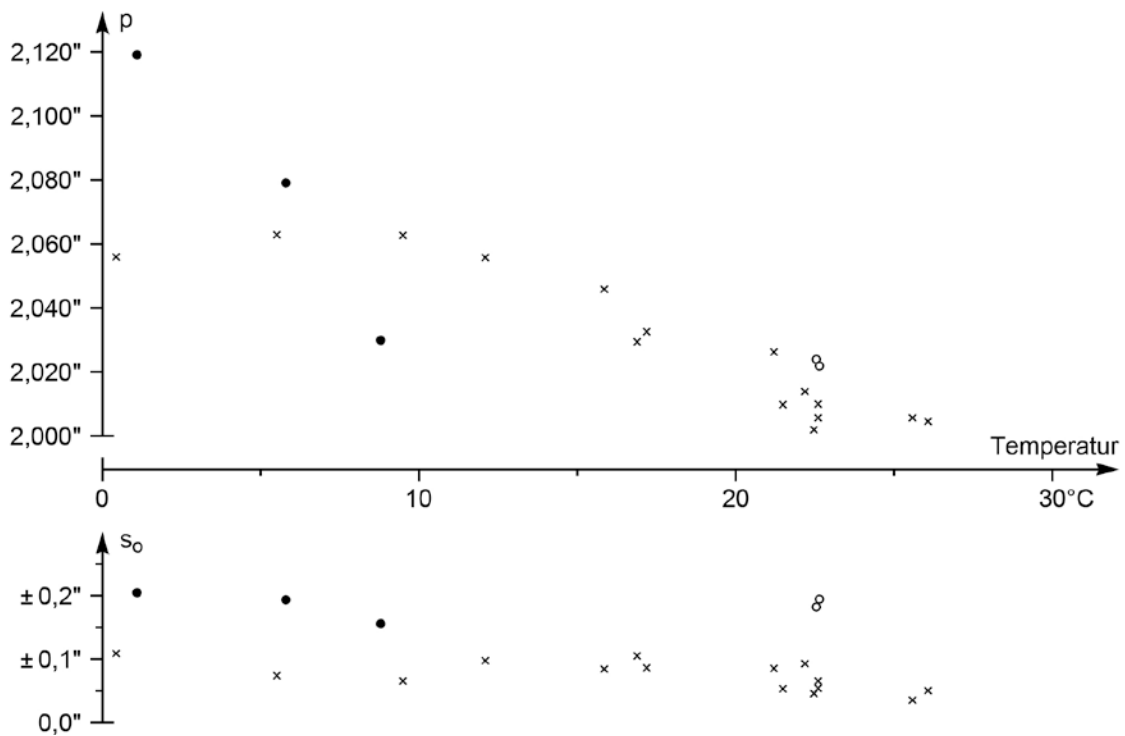


Abb. 26: Darstellung der mittleren Angabe p und der Standardabweichung s_0 über der Temperatur für das NIVELTRONIC.

der Temperatur. Im erfaßten Temperaturbereich von + 0,4 bis + 26,1°C beträgt die Änderung im Mittel - 0,004"/grad. Ein Einfluß der Temperatur auf die Standardabweichung s_0 ist nicht sicher erkennbar.

Bei der Elektrolytlibelle EWB werden sowohl die mittlere Angabe als auch die Meßgenauigkeit durch die Temperatur beeinflusst. Die beiden Komponenten des Neigungsmessers zeigen dieselbe Tendenz allerdings bei unterschiedlicher mittlerer Angabe. Bei den Messungen ist hier ein anderer Temperaturbereich (+ 12,5 bis + 45°C) benutzt worden als bei den zuvor genannten elektronischen Neigungsmessern. Für die temperaturbedingte Änderung der Angabe erhält man den Gradienten + 0,073"/grad für beide Komponenten. Die Standardabweichung s_0 , ausgedrückt in Skalenteilen des Anzeigeinstrumentes, wird nicht nachweisbar durch die Temperatur beeinflusst. Nach der Umrechnung in Sekunden müßte sich eine Änderung von s_0 um denselben Faktor ergeben, der für die mittlere Angabe bestimmt wurde. Tatsächlich erhält man für die Komponente RL - RR eine mittlere Änderung der Standardabweichung um + 0,065"/grad in guter Übereinstimmung mit dem zuvor bestimmten Wert. Über die zweite Komponente ist keine eindeutige Aussage möglich. Es drängt sich aber der Verdacht auf, daß während der Meßreihen bei 12,5°C nicht erkannte Einflüsse auf das Ergebnis eingewirkt haben.

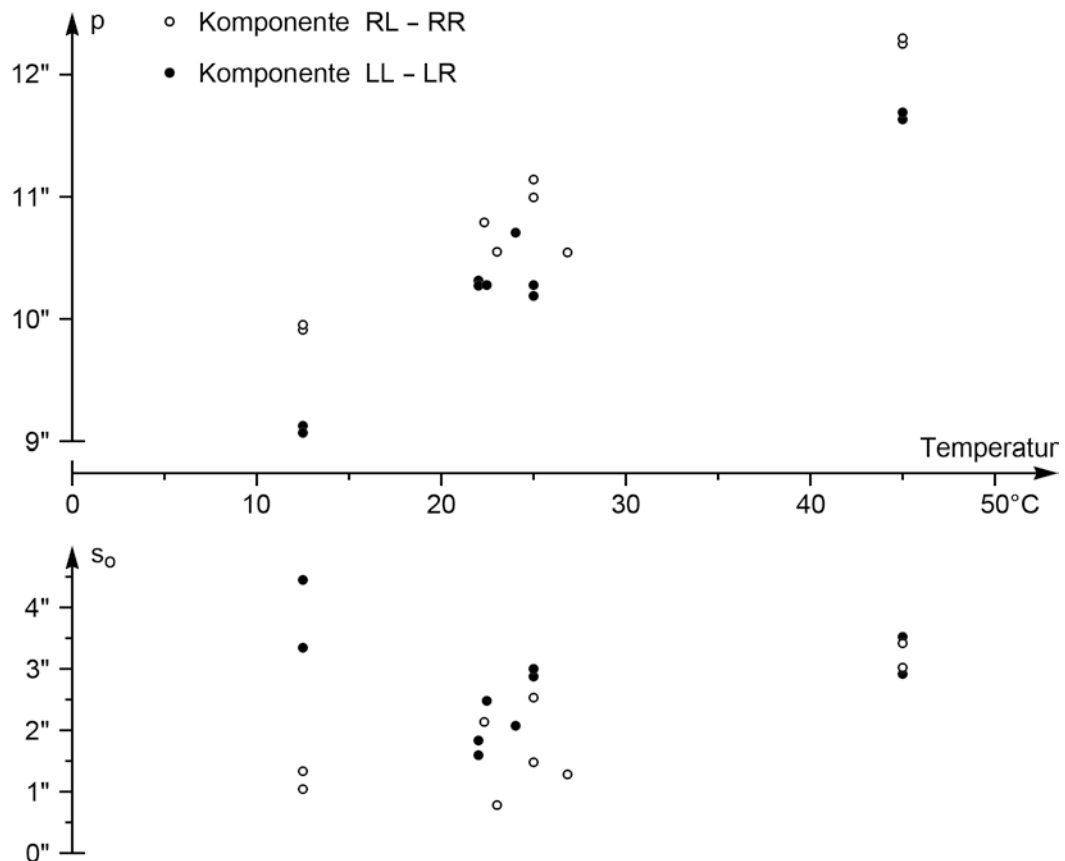


Abb. 27: Darstellung der mittleren Angabe p und der Standardabweichung s_0 über der Temperatur für die elektronische Libelle SCHMIDT EWB.

4.7. Der Einfluß eines Temperaturgradienten

In Abschnitt 2.2.2. wird der Einfluß eines Temperaturgefälles in Längsrichtung der Röhrenlibelle diskutiert. Wegen der überragenden Bedeutung dieser Fehlerquelle bei der Neigungsmessung mit Röhrenlibellen lag es nahe, ähnliche Untersuchungen an elektronischen Neigungsmessern durchzuführen. MONTAG berichtete in [19] über Parallelversuche an einer Röhrenlibelle und einer TALYVEL. Durch einen Infrarotstrahler wurden die Röhrenlibelle und der Neigungsgeber der TALYVEL einseitig bestrahlt, so daß sich ein Temperaturgefälle in Längsrichtung einstellte. Bei der Röhrenlibelle änderte die Gasblase ihre Größe und zeigte Pendelbewegungen verschiedener Frequenz bis zu Amplituden von 30". Die TALYVEL zeigte einen maximalen Ausschlag von 6" und täuschte dabei eine Hebung am bestrahlten Ende vor. Auf Bestrahlung senkrecht zur Längsrichtung zeigte die TALYVEL keine Reaktion.

MILOVANOVIC [16] gelang es mit einem Temperaturdifferenzmeßgerät den Temperaturgradienten in Längsrichtung des von einer Glühbirne angestrahlten Neigungsgebers einer TALYVEL zu messen. Die gleichzeitige Ablesung der Neigungsanzeige ergab eine vorgetäuschte Neigungsänderung von 2,1"/grad. Er führte das Resultat auf die Wärmeausdehnung des Metallgehäuses zurück.

Auf die Wiederholung dieser oder ähnlicher Versuche wurde verzichtet, da keine Meßmittel zur Kontrolle der Versuchsbedingungen zur Verfügung standen.

4.8. Der Einfluß der Querneigung

Für die Durchführung von Neigungsmessungen ist die Frage bedeutsam, bis zu welcher Größe Querneigungen zugelassen werden dürfen, ohne daß eine Beeinträchtigung der Meßgenauigkeit befürchtet werden muß.

SOLTAU [27] ging dieser Frage bei einer TALYVEL I nach und fand, daß eine Änderung der Angabe im Bereich einer Querneigung bis zu $\pm 1,5'$ nicht erkennbar ist.

Nach Firmenangaben ist eine Querneigung bis zu 1° zulässig, ohne daß ein Genauigkeitsverlust befürchtet werden muß, und Querneigungen bis 5° verursachen lediglich eine Verlagerung des Nullpunktes um wenige Sekunden.

In der Bedienungsanleitung für das NIVELTRONIC heißt es, "das Gerät kann bis zu 3° seitlich geneigt werden, ohne daß der Anzeigewert wesentlich beeinflusst wird".

In mehreren Versuchsreihen wurden die TALYVEL A und das NIVELTRONIC auf Querneigungsempfindlichkeit untersucht. Bei jeder gewählten Querneigung wurden zwei Meßreihen nach Abb. 9 durchgeführt. Bei der TALYVEL bestand jede Reihe aus 102 und bei dem NIVELTRONIC aus 62 Einzelablesungen, demzufolge ergaben sich die mittleren Fehler der Angabe für beide Neigungsmesser zu 0,0006" bis 0,0010". Die Einzelergebnisse für den mittleren Angabewert und für die Standardabweichung sind in Abb. 28 dargestellt. Ein Einfluß der Querneigung ist nicht erkennbar. Die Änderungen der Angabe liegen im Bereich weniger Tausendstel einer Sekunde. Allerdings zeigen die Ergebnisse für das NIVELTRONIC einen signifikanten Unterschied der Angabewerte für die jeweils zwei Reihen bei gleicher Querneigung. Die mittlere Angabe ist um 0,004" größer, wenn die Meßreihe mit maximalem positivem Ausschlag begonnen wird.

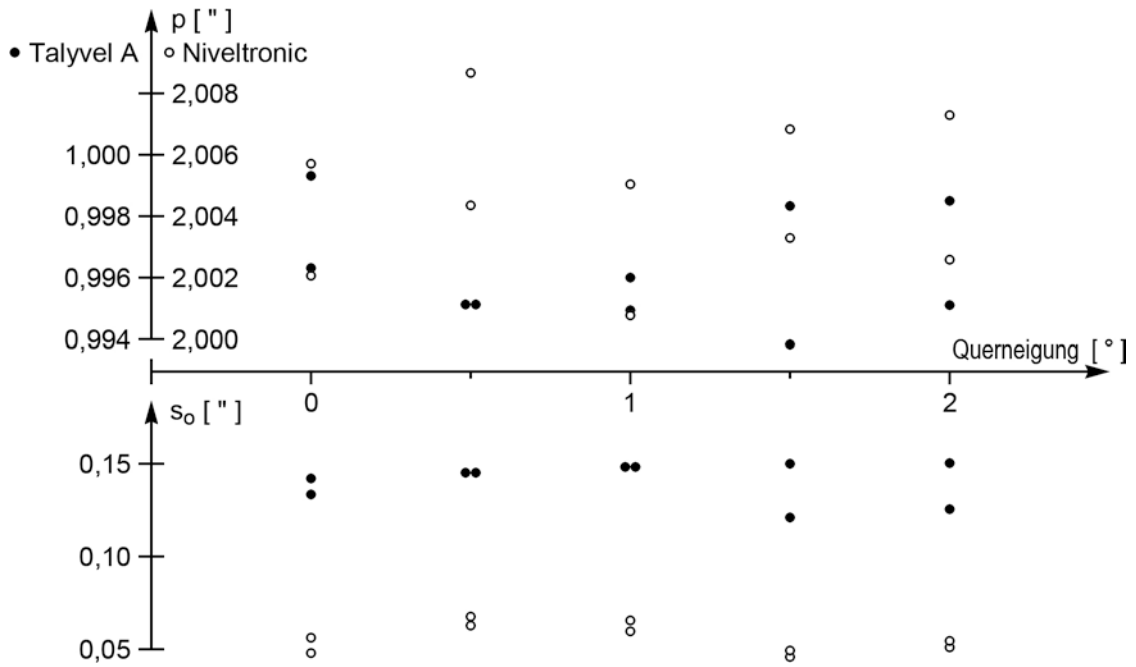


Abb. 28: Darstellung der mittleren Angabe p und der Standardabweichung s_0 einer Ablesung über die Querneigung.

4.9. Das dynamische Verhalten elektronischer Neigungsmesser

Für eine Reihe von technischen Anwendungen, die mit Schwingungen hoher Frequenz verbunden sind, ist das dynamische Verhalten der Neigungsmesser von großer Bedeutung. Im Zusammenhang mit der Planung einer Meßwerterfassungsanlage zur Untersuchung windinduzierter Bewegungen an turmartigen Bauwerken wies MÖHLENBRINK [17] erstmals auf diese Problematik hin. Er kam auf Grund von theoretischen Erwägungen und von Modellrechnungen zu dem Ergebnis, daß für viele Anwendungen die Elektrolytlibellen ausscheiden, daß der SCHAEVITZ-Neigungsmesser wegen seiner Vibrationsempfindlichkeit im Bereich zwischen 0,2 und 20 Hz ebenfalls ungeeignet ist und wohl nur die TALYVEL einen erfolgreichen Einsatz verspricht.

Praktische Untersuchungen zum dynamischen Verhalten der TALYVEL bei Frequenzen um 1 Hz und experimentelle Bestimmungen der Eigenfrequenz lassen GLISSMANN und WENZEL [11] zu dem Schluß kommen: "Die elektronische Libelle TALYVEL reagiert sehr empfindlich auf Horizontalbeschleunigungen und ist deshalb für die Messung schneller Neigungsänderungen auf bewegten Punkten nicht geeignet." Falls elektronische Neigungsmesser für den genannten Einsatz ernsthaft in Betracht gezogen werden, so sind noch gründliche Untersuchungen notwendig, um eine Übersicht über das dynamische Verhalten zu bekommen.

Geht man von den Firmenbeschreibungen aus, so müßte der KINEMATRICS-Neigungsmesser für periodische Bewegungen bis zur Frequenz von 1 Hz geeignet sein.

4.10. Zusammenfassung

Elektronische Neigungsmesser der Systeme TALYVEL, NIVELTRONIC, SCHAEVITZ und SCHMIDT EWB wurden im Labor hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht. Wegen fehlender Meßeinrichtungen konnten nicht alle wünschenswerten Versuche durchgeführt werden, so war es zum Beispiel nicht möglich, Meßreihen bei kontrollierter einseitiger Erwärmung durchzuführen und das dynamische Verhalten zu untersuchen.

Im Sinne der Statistik waren die Stichproben für die einzelnen Neigungsmeßsysteme in keinem Fall groß genug, um zu allgemeingültigen Aussagen zu kommen. Wenn die bei den untersuchten Geräten erzielten Ergebnisse unmittelbar auf weitere Geräte desselben Systems übertragen werden, so muß mit groben Fehlern gerechnet werden. Die Ergebnisse und Aussagen können nur als Orientierungshilfe auf dem vielfältigen Markt der elektronischen Neigungsmesser dienen. Die Variationsbreite der Kenngrößen wird besonders bei den Untersuchungen deutlich, die mit vier Neigungsgebern vom Typ TALYVEL bei gleichen Meßbedingungen erzielt wurden (s. zum Beispiel Tabelle 5).

Benutzt man im ganzen Meßbereich der Neigungsmesser einen konstanten Wert für die Angabe, so muß mit einem mittleren Fehler für eine Ablesung von 0,1" bis 0,2" gerechnet werden. Ein erheblicher Anteil dieses Fehlers hat seine Ursache in der Nichtlinearität der Kennlinie. Eine Erfassung und Berücksichtigung dieser systematischen Fehlerquelle erwies sich als nicht sinnvoll, da die notwendige Reproduzierbarkeit nicht gewährleistet ist. Für die 10"-Libelle EWB und die größeren Meßbereiche bei TALYVEL und NIVELTRONIC gilt diese Aussage entsprechend, wenn die Standardabweichung mit der entsprechenden Angabe multipliziert wird.

Ein Umkehrfehler bei der Änderung der Neigungsrichtung konnte nur bei den TALYVEL-Neigungsmessern nachgewiesen werden.

Bei den Untersuchungen zur Nullpunkt Konstanz für die Dauer von maximal zwei Stunden zeigten die vier TALYVEL-Neigungsgeber ein sehr unterschiedliches Verhalten. Die Driftkonstanten liegen zwischen - 0,7 und + 0,5"/h, wobei sich für die einzelnen Geräte zusätzlich eine starke Temperaturabhängigkeit nachweisen läßt. Das NIVELTRONIC weist eine von der Temperatur unabhängige Driftkonstante von + 0,7"/h auf, während für die SCHAEVITZ nur die Aussage möglich ist, daß mit einer starken Drift gerechnet werden muß, die aber keinesfalls konstant ist. Untersuchungen über längere Zeiträume zeigten, daß bei der SCHAEVITZ die Nullpunktdrift nach etwa fünf Stunden abklingt. Bei der EWB tritt dies nach etwa 12 Stunden ein, während TALYVEL und NIVELTRONIC nur knapp zwei Stunden dazu benötigen.

Ein Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Angabe und die Standardabweichung konnte bei der TALYVEL nicht nachgewiesen werden, NIVELTRONIC und EWB lassen diesen Einfluß dagegen deutlich erkennen.

Querneigungen zwischen + 2° und - 2° beeinflussen die Ergebnisse bei keinem der untersuchten Neigungsmesser.

5. ANWENDUNG ELEKTRONISCHER NEIGUNGSMESSER

In der Literatur sind bisher nur wenige geodätische Anwendungen der elektronischen Neigungsmesser beschrieben worden. Die den Verfassern bekanntgewordenen Veröffentlichungen werden im folgenden kurz zusammengefaßt.

MILOVANOVIC berichtet in [16] über die Verwendung einer TALYVEL bei der Breitenbestimmung mit einem Wild T4 nach der Horrebow-Talcot-Methode. Die TALYVEL hat sich dabei bestens bewährt. Die erzielte Genauigkeit der Breitenbestimmung verglichen mit den konventionellen Röhrenlibellen ist ungefähr gleich.

GEIGER [8] verwendete neben der Hängelibelle eines Wild T4 zur Bestimmung der Stehachsneigung gleichzeitig eine ELECTROLEVEL (Elektrolytlibelle) der British Aircraft Corporation. Ein Vergleich der Messungsergebnisse der Röhrenlibelle und der ELECTROLEVEL auf mehreren Lotabweichungsstationen I. Ordnung ergab eine relativ schlechte Übereinstimmung, die auf eine große Drift der ELECTROLEVEL und auf das ziemlich schwere Verbindungskabel zum Anzeigegerät zurückzuführen war.

GLISSMANN und WENZEL [10] setzten zwei TALYVEL-Neigungsgeber kombiniert mit zwei Wild N3 Nivellieren beim Stromübergangsnivellement ein. Über eine TALYVEL-Schaltweiche konnte die Neigung der beiden Nivelliere abwechselnd an einem Digitalvoltmeter angezeigt und auf Lochstreifen registriert werden. Die Gegenüberstellung mit einer ZEISS Ni2 Stromübergangsausrüstung brachte bei gleicher Genauigkeit einen etwa zweifachen Zeitgewinn für die Beobachtung. Dazu kommt noch der Vorteil der Registrierung im Felde.

PELZER berichtet in [22] über Messungen von Turmbewegungen mit Hilfe von TALYVEL-Neigungsmessern. Dabei wurden in verschiedenen Höhen die Neigungsgeber kreuzweise angebracht und die Neigungen registriert. Als Genauigkeit wird $\pm 2''$ angegeben. Die Bewegung des Turmes konnte mit einem mittleren Fehler von maximal 1 - 2 mm (für die ca. 120 m hohe Turmspitze) ermittelt werden.

Eine weitere Anwendung der TALYVEL schildert PELZER in "Meßtechnische und mathematische Probleme bei der geodätischen Überwachung von Turbinenanlagen" [23]. Zur Bestimmung von Höhenänderungen und Kippungen einer Turbinenwelle werden bis zu acht Neigungsgeber auf den einzelnen Lagerböcken der Turbinenwelle angebracht. Aus den Messungen können auch Verformungen der Lagerböcke angegeben werden. Auf Grund von Vibrationen kann die Genauigkeit der TALYVEL nicht voll ausgenutzt werden. Die erreichte Genauigkeit von 0,02 mm/m wird jedoch als voll ausreichend angesehen. Neben den Neigungsgebern werden noch Höhenggeber, Extensometer und Temperaturfühler zur Überwachung der Turbinenanlage eingesetzt. Die Meßdaten werden einer zentralen Meßwerterfassungsanlage zugeführt und können so jederzeit registriert oder angefragt werden.

Zur Überwachung einer Felswand im Gebiet der Staumauer Luzzone (Schweiz) wurden schon 1960 drei MAIHAK Schwingsaitenneigungsmesser MDS 81 a eingesetzt [26]. Die drei Geber wurden bis zur Fertigstellung der Staumauer während etwa sechs Monaten halbstündlich und auch noch danach etwa drei Monate lang wöchentlich abgelesen. Die Neigungsänderungen betragen maximal 140".

Zwei weitere Anwendungen von MAIHAK-Neigungsmessern werden von MÜLLER-KIRCHENBAUER und LINDER [20] zur Untersuchung der seitlichen Beanspruchbarkeit von Pfählen und von OTTA und RICKERT

[21] zur Untersuchung von Verschiebungen einer verankerten Baugrubenumschließung beschrieben.

Einige bemerkenswerte Anwendungen des "KINEMATRICS Biaxial Tiltmeter" beschreiben HAIRFIELD und KIRKPATRICK in [13]. Seit 1958 wurde dieser Neigungsmesser als Teil des Inertialnavigationssystems für Raketen verwendet und in den letzten Jahren für geophysikalische Untersuchungen und für Standfestigkeitsmessungen von Kreiselplattformen eingesetzt. Ein weiteres Anwendungsgebiet besteht in der Bestimmung der Richtungsfehler von Radarachsen und optischen Verfolgungsbahnen. Hierbei wird besonders hervorgehoben, daß der KINEMATRICS-Neigungsmesser permanent installiert werden kann und sogar unter extremen Beschleunigungsbedingungen keinerlei Schutz benötigt. Durch die große Empfindlichkeit und Bandbreite erhält man eine hohe Genauigkeit bei sehr kurzen Ablesezeiten. Durch Messung von Verschiebungen und Beschleunigungen zusammen mit den Neigungen kann auch der Zustand von Radarlagerungen bestimmt werden.

Die Neigungsmesser können wie konventionelle Libellen sowohl für absolute Neigungsbestimmungen als auch für Neigungsänderungen eingesetzt werden. Ähnlich wie bei einer konventionellen Libelle muß für die absolute Neigungsbestimmung in zwei "Lagen" gemessen werden, d.h., der Neigungsmesser muß nach der ersten Messung um 200 gon gedreht werden. Bildet man das Mittel aus beiden Ableesungen, so erhält man die Neigung der Aufsatzfläche. Möchte man die Genauigkeit des jeweiligen Neigungsmessers voll ausnutzen, so ist es unabdingbar notwendig, daß die Aufsatzfläche entsprechend plan ist. Der "Aufstellfehler" des Neigungsmessers, der von der Beschaffenheit der Aufsatzfläche abhängig ist, muß dann kleiner sein als die Fehler des Neigungsmessers und die Ablesefehler. Dasselbe gilt auch für die Bestimmung von Neigungsänderungen bei Objekten, bei denen der Neigungsmesser nicht permanent installiert ist. SZYMCIK berichtet in [28] über Messungen mit der TALYVEL 1 auf verschiedenen Aufsatzflächen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im folgenden kurz zusammengefaßt.

Als Aufsatzfläche dienten:

1. eine Betonsäule, auf der der Aufstellort der TALYVEL mit Hilfe eines Ritzstiftes markiert war,
2. eine Terrazzoplatte mit derselben Markierung wie unter 1.,
3. eine geschliffene Metallplatte mit Bolzen, die den Aufstellort der TALYVEL markierten,
4. eine Terrazzoplatte, auf der die TALYVEL mit einer Blockbasis (Zusatzgerät zur TALYVEL: Länge 30 cm, Breite 5 cm) aufgestellt wurde,
5. eine Metallplatte mit einer Blockbasis,
6. eine Metallplatte mit Bolzen, deren Oberfläche mit einer Genauigkeit von $\pm 0,0025$ mm bearbeitet war.

Für die einzelnen Meßreihen (Einteilung s.o.) wurden die Standardabweichungen berechnet, die in Tabelle 9 dargestellt sind.

Die Tabelle zeigt eindeutig den Zusammenhang zwischen der Beschaffenheit der Aufsatzfläche und dem zufälligen Fehler der Neigungsmessung. Die Leistungsfähigkeit, die im 4. Kapitel nachgewiesen wurde, kann beim Einsatz der TALYVEL als Aufsatzneigungsmesser nicht voll ausgeschöpft werden. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen muß die Aufsatzfläche sehr präzise bearbeitet sein. Ist dies nicht gegeben, so kann durch den Einsatz der Blockbasis eine merkliche Steigerung der Neigungsmeßgenauigkeit erzielt werden.

| Bereich \ Meßreihe | ± 50" | ± 100" | ± 8' |
|--------------------|---------|--------|--------|
| | s ["] | | |
| 1 | ± 7,0 | ± 9,3 | ± 10,0 |
| 2 | 4,3 | 4,5 | 4,9 |
| 3 | 1,0 | 1,2 | 1,6 |
| 4 | 1,0 | 1,2 | 1,6 |
| 5 | 0,8 | 1,2 | 1,6 |
| 6 | 0,4 | 0,8 | 1,6 |

Tabelle 9: Standardabweichungen s für alle Meßbereiche der TALYVEL 1 bei sechs verschiedenen Aufsatzflächen.

Die einzelnen Firmen nennen folgende Einsatzmöglichkeiten und Hauptanwendungsgebiete:

TALYVEL: Maschinenbau (Prüfen von Maschinenbetten auf Geradheit oder Verwindung; Rechtwinkligkeit von Ständerführungen zu den Bettführungen; Prüfen von Richtplatten; Einrichten von Großmaschinen; Balligkeitsmessung von Walzen),

Brückenbau (Überwachung von Brückenbewegungen), Kraftanlagen (Überwachung von Fundamentsenkungen und in Verbindung mit einem Micro-Fluchtfernrohr das Ausrichten von Turbinenachsen zu Generatorachsen), Einbau in Radaranlagen, Kreisel- und Geschützplattformen und an Schiffsantriebsmaschinen.

NIVELTRONIC: Ausrichten und Prüfen von horizontalen und vertikalen Ebenen und Zylindern (Kontrolle der Neigung einer Bohrwerksspindel und ihres Verhaltens bei Axialverschiebungen; Prüfung der Lotrechten an einem Maschinenständer; Prüfung des Ablaufes eines Drehbankschlittens; Kontrolle von Neigung und Ebenheit eines Maschinentisches).

SCHAEVITZ: Baumaschinensektor (automatische Kontrolle der Neigung von Baggerauslegern; Überwachungssysteme von vorgegebenen Neigungen von Straßenbau-, Teer- und Bergbaumaschinen), Überwachung von Schiffsladungen und Meeresplattformen, Einrichtung von Maschinen, Neigungsmessungen an Bohrlöchern.

SCHMIDT: Keine speziellen Anwendungen werden genannt.

KINEMATRICS: Erdbebenseismik (Erdbebenvorhersage; Faltenuntersuchungen; Kurz- und Langzeitseismometrie),

Geophysik (Krustendeformation; Erdgezeiten; Gletscherbewegungen),

Geologie und Bauingenieurwesen (Senkungserscheinungen; Überwachung von Fundamentgründungen und Staudammfüllungen; Bodenmechanik).

MAIHAK: Beton- und Stahlbau, Erd- und Wasserbau, Felsmechanik (Überwachung von Lage- und Formänderungen an Staumauern, Dämmen, Türmen, Masten, Hochhäusern, Brücken, Fundamenten, Kaimauern und Felswänden; Kontrolle ungleichmäßiger Setzungenbewegungen und unregelmäßiger Biegungslinien), Bergbau (Lösung markscheiderischer Aufgaben in Strecke und Streb; Bergschadenüberwachung durch recht-

zeitiges Erkennen abbaubedingter Lageveränderungen von Bauwerken im Bergschadensgebiet und der Bedrohung bergmännischer Hohlräume durch Gebirgsverschiebungen), Schachtbau (Schacht – Schiefelagebestimmung; Kontrolle der Fundamentbewegungen in Gefrierschächten; Spurlattenkontrolle).

Die von den Firmen genannten Einsatzbeispiele für die elektronischen Neigungsmesser reichen in ein Arbeitsgebiet hinein, dessen sich der Vermessungsingenieur mehr und mehr annehmen muß. Es ist das zur Ingenieurgeodäsie zu zählende Arbeitsgebiet der Deformationsuntersuchungen, bei dem Form- und Lageänderungen von Objekten bestimmt werden zum Zwecke der Überwachung von Standfestigkeit, Funktionstüchtigkeit oder Betriebssicherheit. Die Ergebnisse dienen entweder der Beweissicherung oder sie führen zu Maßnahmen wie Justierung, Sanierung oder schlimmstenfalls Beseitigung eines zur Gefahr gewordenen Objektes. Die hohe Verantwortung, die damit verbunden ist, kann der Vermessungsingenieur nur übernehmen, wenn ihm genaue und zuverlässige Meßgeräte zur Verfügung stehen. Der Einsatz der elektronischen Neigungsmesser bietet sich auf diesem Gebiet besonders an, da er die Möglichkeit der permanenten Messung und Überwachung eröffnet.

Die aus der Literatur [16], [8] und [10] mitgeteilten Beispiele zeigen, daß auf dem geodätischen Instrumentensektor offenbar ebenfalls ein gewisses Interesse am Einsatz elektronischer Neigungsmesser als Ersatz für Sekundenlibellen besteht. Die Leistungsfähigkeit der Neigungsmesser läßt sie für dieses Aufgabengebiet auch als geeignet erscheinen. Der Aufbau der Geräte ist hier aber noch ein großes Hindernis. Integrierte Geräte sind für diesen Zweck zu groß und schwer und Geräte, bei denen Meß- und Anzeigeteil getrennt sind, erfordern eine sperrige und Momente erzeugende Kabelverbindung. Eine durchaus im Bereich des technisch Möglichen liegende Miniaturisierung der Geräte ist daher die Voraussetzung für die erfolgreiche Verwendung im geodätischen Instrumentenbau.

Literaturverzeichnis

- [1] Barnes, G. L. and Mueller, I. I.: The dependence of the level-sensitivity on the position and length of the bubble on the Wild T 4 theodolite. Bulletin Géodésique 80 (1966) S. 277 - 286.
- [2] Bösenecker, F.: Untersuchung der elektronischen Libelle TALLYVEL und der elektrischen Wasserwaage SCHMIDT EWB 2. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der Wissenschaftlichen Einrichtung Geodäsie der Hochschule der Bundeswehr, Neubiberg (1976).
- [3] Brein, R.: Beitrag zur Libellenprüfung. DGK Reihe B Nr. 21 München (1976).
- [4] Brunken, G.: Eichung von Sekundenlibellen. ZfV 99 (1974) S. 60 - 68.
- [5] Deichl, K. und Ludwig, H.: Zur Eichung von Sekundenlibellen. ZfV 96 (1971) S. 193 - 202.
- [6] Drodofsky, M.: Libelle mit Anzeige durch Gasblasen. DGK Reihe C 17 (1956).
- [7] Fajnor, S.: An Investigation into the Accuracy of the B.A.C. Electrolevel, Imperial College (Royal School of Mines), London, England (1969).
- [8] Geiger, A.: Report on the B.A.C. Electrolevel. Research and Development Section, Geodetic Survey of Canada, Ottawa, Kanada (1970).
- [9] Gigas, E.: Interferenzmethode zur genauen Libellenuntersuchung. DGK Reihe A Nr. 3 München (1952).

- [10] Glissmann, T. und Wenzel, G.: Eine digitalisierte elektronische Libelle mit automatischer Registrierung der Neigungsanzeige. AVN 6 (1972) S. 239 - 241.
- [11] GLISSMANN, T. und Wenzel, G.: Zur Problematik der Neigungsmessung mit Pendelneigungsmessern auf bewegten Türmen. ZfV 102 (1977) S. 67 - 73.
- [12] Groot, R.: An investigation of a geodetic astronomical level by the "Wisconsin" method. Department of Energy, Mines and Resources, Geodetic Survey of Canada, Ottawa, Canada (1969).
- [13] Hairfield, H. D. and Kirkpatrick, C. G.: Application of the Autonetics Biaxial Tiltmeter to Error Correction in Radar and Optical Tracker Axes. Vortrag gehalten auf der "Military Electronics Defense Expo 1976" in Wiesbaden.
- [14] Hallermann, L. und Kalischewski, N.: Bemerkungen zum Temperatureinfluß bei der elektronischen Libelle Talyvel. ZfV 101 (1978) S. 20 - 27.
- [15] Hirvonen, R. A.: Bestimmung der Libellenempfindlichkeit und eines konstanten Verhältnisses im allgemeinen. ZfV 75 (1950) S. 137 - 139.
- [16] Milovanovic, V.: Einige Erfahrungen mit der elektronischen Libelle "Talyvel". ZfV 93 (1968) S. 66 - 70.
- [17] Möhlenbrink, W.: Studie zur Entwicklung von Meßeinrichtungen zur fortlaufenden Messung und Registrierung windinduzierter Bewegungen turmartiger Bauwerke. DGK, Reihe B 215 (1976).
- [18] Möhlenbrink, W.: Zur Problematik von Pendelneigungsmessern. ZfV 102 (1977) S. 74 - 76.
- [19] Montag, H.: Untersuchung der elektronischen Libelle Talyvel. Vermessungstechnik 12 (1964) S. 419 - 422.

- [20] Müller-Kirchenbauer, H. und Linder, W. R.: Untersuchungen zur seitlichen Beanspruchbarkeit von Pfählen (Teil II). Die Bautechnik 54 (1977), S. 381 - 385.
- [21] Otta, L. und Rickert, J.: Verankerte Baugrubenumschließung für den Neubau "Hotel International" in Zürich-Oerlikon, Stump Bohr AG, Zürich. Sonderdruck Schweizerische Bauzeitung 88 (1970).
- [22] Pelzer, H.: Methoden zur kontinuierlichen Erfassung von Bauwerksdeformationen. Geodätische Woche Köln, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart (1975) S. 74 - 78.
- [23] Pelzer, H.: Meßtechnische und mathematische Probleme bei der geodätischen Überwachung von Turbinenanlagen. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 23 (1977) S. 319 - 331.
- [24] Reinhertz, C.: Mitteilungen über einige Beobachtungen an Libellen. Zeitschrift für Instrumentenkunde 10 (1890) S. 309 - 360.
- [25] Samel, P.: Der Einfluß von Luftdruck und Temperatur auf die Angabe von Röhrenlibellen. ZfV 62 (1913) S. 569 - 622.
- [26] Schmidt, H.: Dauermessungen mit Maihak-Feinmeßgeräten bei der Staumauer von Luzzone. Sonderdruck aus Schweizerische Bauzeitung 81 (1963).
- [27] Soltau, G.: Ein Beitrag zur Untersuchung von geodätischen Instrumenten mit automatisch einspielenden Höhenableseeinrichtungen. Wissenschaftliche Arbeiten der Lehrstühle für Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie an der TH Hannover, Dissertation (1966).
- [28] Szymczyk, M.: Einsatzprobung des Neigungsmessers Talyvel 1 (Originaltitel: Badania testowe pochyomierza Talyvel 1). Przegląd Geodezyjny Nr. 9 (1975) S. 370 - 374.
- [29] Tarczy-Hornoch, A.: Über die Messung mit Sekundenlibellen. Vermessungstechnik 9 (1961) S. 363 - 370.

- [30] Tarczy-Hornoch, A. und Alpár, G.: Zur genauen Bestimmung kleiner Neigungswinkel mittels Sekundenlibellen. Geodätisches Forschungslaboratorium der ungarischen Akademie der Wissenschaften Sopron (1964) S. 397 - 407.
- [31] Tarczy-Hornoch, A.: Vorteile der Eichwerte gegenüber dem durchschnittlichen Parswert bei Sekundenlibellen. AVN 10 (1966) S. 420 - 423.
- [32] Wanach, B.: Untersuchungen von Sekundenlibellen. Zeitschrift für Instrumentenkunde 66 (1926) S. 221 - 238.
- [33] Wyss, N.: Neigungsbestimmung mit Berücksichtigung systematischer Libellenfehler. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie 55 (1957) S. 153 - 164.

Firmenanschriften:

- KINEMETRICS: Kinemetrics Inc., 222 Vista Ave., Pasadena, California 91107, USA.
- MAIHAK: H. Maihak AG, Postfach 601 709, 2000 Hamburg 60.
- NIVELTRONIC: Tesa S.A., 1020 Renens, Schweiz, und Wyler AG, 8045 Winterthur, Schweiz.
- SCHAEVITZ: Schaevitz Engineering, P.O. Box 505, Camden, N.J. 08101, USA.
- SCHMIDT: RMS Dipl.-Ing. Schmidt KG, Gutenbergstr. 27, 2057 Reinbek.
- TALYVEL: Rank Taylor Hobson, P.O. Box 36, Leicester House, Lee Circle, Leicester LE 91 B, England.

